

# **EFEITO DA DANIFICAÇÃO MECÂNICA EM SISTEMAS DE IMPERMEABILIZAÇÃO DE ATERROS DE RESÍDUOS**

**ANA CLÁUDIA MACHADO BRÁS**

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de  
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM MATERIAIS E PROCESSOS DE  
CONSTRUÇÃO**

---

Orientador: Professora Doutora Maria de Lurdes da Costa Lopes

---

Coorientador: Doutor José Ricardo da Cunha Carneiro

JULHO DE 2017

## **MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2016/2017**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ [miec@fe.up.pt](mailto:miec@fe.up.pt)

*Editado por*

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ [feup@fe.up.pt](mailto:feup@fe.up.pt)

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2016/2017 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2017*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus Pais

*The hardest part of ending is starting again.*

*LP*





## **AGRADECIMENTOS**

No final do meu percurso acadêmico, não poderia deixar de agradecer a quem, de alguma maneira, me acompanhou e contribuiu para a realização deste trabalho.

À minha orientadora Professora Doutora Maria de Lurdes Lopes, pelos conhecimentos transmitidos;

Ao meu coorientador Doutor José Ricardo Carneiro, pela disponibilidade, apoio e pelas diretrizes dadas ao longo da realização desta dissertação;

Ao Engenheiro Paulo Peixoto Pereira, por todo o apoio, conhecimento e disponibilidade nos momentos imprevisíveis.

À Teresa, ao Paulo e ao Cristiano, pela amizade incondicional desde o início deste percurso.

Ao André, pelo carinho, apoio e incentivo.

À minha avó, Augusta, pelo exemplo de força e pela alegria que irradia constantemente.

Uma palavra de apreço a quem me viu crescer, a quem eu vi crescer e a quem cresceu comigo, durante a minha passagem por esta faculdade. Por todos os momentos, pela confiança depositada em mim e pelos desafios no dia-a-dia que, sem eles, não seria aquilo que sou hoje. Levo-vos comigo para a vida.

Por último, e os mais importantes, aos meus pais, José e Paula, pelo carinho e apoio incondicional, pela força e exemplo, por toda a paciência para lidar com o meu humor e por tudo o que me ensinaram durante toda a minha existência.

A todos, um enorme obrigado, por me darem a oportunidade de partilhar este caminho convosco e por fazerem destes anos os melhores da minha vida.



## RESUMO

Os geossintéticos são materiais poliméricos que desempenham um papel importante em obras geotécnicas de carácter ambiental, como é o caso da impermeabilização de aterros de resíduos. A qualidade do sistema de impermeabilização é um fator fundamental para o correto desempenho do aterro. A ausência dessa qualidade poderá provocar falhas na barreira de impermeabilização (geomembrana) e, conseqüentemente, a contaminação do solo derivada do seu contacto com os resíduos. Os processos de instalação em obra podem provocar alguns danos nos geossintéticos, pelo que é importante garantir que esses danos não impedem os materiais de desempenharem corretamente as suas funções.

Este trabalho consistiu no estudo e avaliação dos efeitos da danificação mecânica sob carga repetida em sistemas de impermeabilização de aterros de resíduos. O sistema era composto pela combinação de um geotêxtil não-tecido, uma geomembrana e um geocompósito bentonítico e foi submetido a simulações laboratoriais de danificação mecânica sob carga repetida, segundo a norma EN ISO 10722:2007. Os ensaios de danificação mecânica foram realizados com diferentes agregados (*corundum*, resíduos de construção e demolição cerâmicos ou brita 14/20), com diferentes bases de ensaio (base rígida, base flexível com índice de compactação de 50% ou 80%) e com dois geotêxteis de proteção com diferentes massas por unidade de área (300 ou 400 g/m<sup>2</sup>). O geotêxtil GTX300 foi também sujeito a ensaios de danificação mecânica isoladamente (usando a base rígida) de modo a comparar os danos ocorridos nesse ensaio com os danos que ocorrem quando o geotêxtil é danificado simultaneamente com os outros dois geossintéticos (geomembrana e geocompósito bentonítico).

A avaliação da danificação foi feita através de inspeção visual (avaliação qualitativa) e através da monitorização das propriedades mecânicas dos materiais (avaliação quantitativa). A caracterização das propriedades mecânicas dos geossintéticos foi realizada através de ensaios de tração (ASTM D638-10 para a geomembrana e NP EN ISO 10319:2005 para os restantes geossintéticos), punçoamento estático (NP EN ISO 12236:2008) e rasgamento (ASTM D1004-09, realizado apenas para a geomembrana).

De um modo geral, a danificação induzida no sistema de impermeabilização não foi muito significativa. O desempenho da geomembrana (na sua função de barreira de fluídos) e do geocompósito bentonítico não foi comprometido, uma vez que não existiram variações relevantes nas suas propriedades mecânicas. O *corundum* foi o agregado que induziu uma maior perda de resistência aos geotêxteis de proteção, independentemente da sua massa por unidade de área. Contudo, os danos causados pelo *corundum* não foram suficientes para a ocorrência de falhas na função de proteção dos geotêxteis. O resíduo de construção e demolição cerâmico provocou menos danos nos geotêxteis do que o *corundum*, pelo que a sua utilização como camada drenante de um aterro de resíduos, em termos de danificação mecânica induzida aos geossintéticos, poderá ser uma opção válida. Os ensaios de danificação mecânica com brita 14/20 permitiram concluir que as perdas de resistência ocorridas nos geotêxteis foram intermédias às ocorridas com os outros agregados. Os geossintéticos apresentaram um comportamento relativamente idêntico, independentemente da base de ensaio usada.

**PALAVRAS-CHAVE:** Geossintéticos, Danificação mecânica, Aterros de resíduos, Sistemas de impermeabilização



**ABSTRACT**

Geosynthetics are polymeric materials with an important role in geotechnical works of environmental nature, such as waterproofing of waste landfills. The quality of the waterproofing system is a fundamental factor for the correct performance of the landfill. The absence of that quality may cause failures on the waterproofing barrier (geomembrane) and, consequently, soil contamination due to the contact with the waste. The installation procedures may cause some damage to the geosynthetics, being important to ensure that these damage does not restrain the materials from properly performing their functions.

This work consisted in the study and evaluation of the effects of mechanical damage under repeated loading in waterproofing systems of waste landfills. The system was composed by a non-woven geotextile (GTX400 or GTX300), a geomembrane and a geosynthetic clay liner and was submitted to mechanical damage under repeated loading in laboratory, according to EN ISO 10722:2007. The mechanical damage tests were performed with different aggregates (*corundum*, ceramic construction and demolition waste or gravel 14/20), different test bases (rigid base, flexible base compacted to 50% or 80 %) and with two protective non-woven geotextiles with different masses per unit area (300 or 400 g/m<sup>2</sup>). The non-woven geotextile GTX300 was also submitted to the same test in isolation (rigid base) in order to compare the damage occurred in this test with the damage that occurs when the geotextile is damaged with the other geosynthetics (geomembrane and a geosynthetic clay liner).

The damage evaluation was carried out by visual inspection (qualitative evaluation) and by monitoring the mechanical properties of the materials (quantitative evaluation). The characterisation of the mechanical properties of the geosynthetics was performed by tensile tests (ASTM D638-10 for the geomembrane and NP EN ISO 10319: 2005 for the remaining geosynthetics), static puncture tests (NP EN ISO 12236:2008) and tearing tests (ASTM D1004-09, performed only for the geomembrane).

In general, the damage induced in the waterproofing system was not much relevant. The performance of the geomembrane (as fluid barrier) and of the geosynthetic clay liner was not compromised, since there were no relevant changes in their mechanical properties. *Corundum* was the aggregate that induced a greater resistance loss to the geotextiles, regardless of their mass per unit area. However, the damage caused by *corundum* did not inhibited the geotextiles from performing correctly their function (protection of the geomembrane). The ceramic construction and demolition waste caused less damage to the geotextiles than *corundum* and therefore its use as a drainage layer in waste landfills, in terms of mechanical damage induced to geotextiles (and other geosynthetics of the waterproofing system), may be a valid option. The mechanical damage tests with gravel 14/20 allowed to conclude that the resistance losses found in the geotextiles were intermediate to those occurred with the other aggregates. The geosynthetics had a relatively similar behaviour, independently of the test base.

**KEYWORDS:** Geosynthetics, Mechanical damage, Waste landfill, Waterproofing system



## **ÍNDICE GERAL**

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>I</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>III</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>V</b>
<b>ÍNDICE GERAL</b> .....	<b>VII</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>XI</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS</b> .....	<b>XV</b>
<b>SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS</b> .....	<b>XVII</b>

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS .....	1
1.2. OBJETIVOS DO TRABALHO .....	1
1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO .....	2
<b>2. GEOSSINTÉTICOS</b> .....	<b>3</b>
2.1. INTRODUÇÃO .....	3
2.2. MATERIAIS CONSTITUINTES .....	4
2.3. CLASSIFICAÇÃO DOS GEOSSINTÉTICOS .....	5
2.3.1. GEOTÊXTEIS .....	6
2.3.2. GEOMEMBRANA .....	7
2.3.3. GEOCOMPÓSITOS .....	8
2.4. FUNÇÕES DOS GEOSSINTÉTICOS .....	9
2.5. APLICAÇÕES DOS GEOSSINTÉTICOS .....	13
2.6. PROPRIEDADES DOS GEOSSINTÉTICOS .....	14
2.6.1. PROPRIEDADES FÍSICAS .....	14
2.6.2. PROPRIEDADES HIDRÁULICAS .....	15
2.6.3. PROPRIEDADES MECÂNICAS .....	15
2.6.4. PROPRIEDADES RELATIVAS À DURABILIDADE .....	16
2.7. ATERROS DE RESÍDUOS .....	17
2.7.1. CONCEITOS GERAIS .....	17
2.7.2. SISTEMA DE IMPERMEABILIZAÇÃO DE ATERROS DE RESÍDUOS .....	18

<b>3. DANIFICAÇÃO MECÂNICA DE GEOSSINTÉTICOS .....</b>	<b>21</b>
3.1. INTRODUÇÃO .....	21
3.2. DANIFICAÇÃO MECÂNICA DURANTE A INSTALAÇÃO .....	21
3.2.1. MECANISMOS DE DANIFICAÇÃO .....	23
3.2.2. MODOS DE MINIMIZAR OS EFEITOS DA DDI .....	24
3.2.3. MÉTODOS DE SIMULAÇÃO DDI .....	26
3.2.3.1. Ensaios de campo .....	26
3.2.3.2. Simulação laboratorial .....	26
3.2.4. Alguns estudos de ensaios de danificação mecânica realizados anteriormente .....	26
 <b>4. PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>	 <b>29</b>
4.1. INTRODUÇÃO .....	29
4.2. GEOSSINTÉTICOS .....	30
4.3. ENSAIO DE DANIFICAÇÃO MECÂNICA SOB CARGA REPETIDA .....	31
4.3.1. EQUIPAMENTO E PROCEDIMENTO .....	31
4.3.2. PLANO DE ENSAIOS .....	35
4.3.3. AGREGADOS UTILIZADOS NO ENSAIO DE DANIFICAÇÃO MECÂNICA .....	36
4.3.4. SOLO UTILIZADO NA BASE FLEXÍVEL DO ENSAIO DE DANIFICAÇÃO MECÂNICA .....	37
4.4. CARACTERIZAÇÃO DA DANIFICAÇÃO MECÂNICA .....	39
4.4.1. ENSAIO DE TRAÇÃO EM TIRAS LARGAS: NP EN ISO 10319: 2005 .....	39
4.4.1.1. Procedimento .....	39
4.4.1.2. Tratamento de dados .....	40
4.4.2. ENSAIO DE TRAÇÃO: ASTM D638-10 .....	42
4.4.2.1. Procedimento .....	42
4.4.2.2. Tratamento de dados .....	44
4.4.3. ENSAIO DE PUNÇOAMENTO ESTÁTICO .....	46
4.4.3.1. Procedimento .....	46
4.4.3.2. Tratamento de dados .....	47
4.4.4. ENSAIO DE RASGAMENTO .....	49
4.4.4.1. Procedimento .....	49
4.4.4.2. Tratamento de dados .....	50



<b>5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....</b>	<b>51</b>
<b>5.1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>51</b>
<b>5.2. GEOTÊXTIL NÃO-TECIDO GTX400 .....</b>	<b>51</b>
5.2.1. INSPEÇÃO VISUAL .....	51
5.2.2. ENSAIOS COM BASE RÍGIDA .....	52
5.2.2.1. Ensaio de tração .....	52
5.2.2.2. Ensaio de punção estático .....	53
5.2.3. ENSAIOS COM BASE FLEXÍVEL COM ÍNDICE DE COMPACIDADE DE 50% .....	54
5.2.3.1. Ensaio de tração .....	54
5.2.3.2. Ensaio de punção estático .....	56
5.2.4. ENSAIOS COM BASE FLEXÍVEL COM ÍNDICE DE COMPACIDADE DE 80% .....	57
5.2.4.1. Ensaio de tração .....	57
5.2.4.2. Ensaio de punção estático .....	59
<b>5.3. GEOTÊXTIL NÃO-TECIDO GTX300 .....</b>	<b>61</b>
5.3.1. ENSAIO EM CONJUNTO .....	61
5.3.1.1. Inspeção visual .....	61
5.3.1.2. Ensaio de tração .....	62
5.3.1.3. Ensaio de punção estático .....	63
5.3.2. ENSAIO ISOLADO .....	64
5.3.2.1. Inspeção visual .....	64
5.3.2.2. Ensaio de tração .....	65
5.3.2.3. Ensaio de punção estático .....	66
<b>5.4. GEOMEMBRANA .....</b>	<b>68</b>
5.4.1. INSPEÇÃO VISUAL .....	68
5.4.2. ENSAIOS REALIZADOS COM O GEOTÊXTIL DE PROTEÇÃO GTX400 .....	69
5.4.2.1. Ensaio de tração .....	69
5.4.2.2. Ensaio de punção estático .....	71
5.4.2.3. Ensaio de rasgamento .....	72
5.4.3. ENSAIOS REALIZADOS COM O GEOTÊXTIL DE PROTEÇÃO GTX300 .....	72
5.4.3.1. Ensaio de tração .....	72
5.4.3.2. Ensaio de punção estático .....	73
5.4.3.3. Ensaio de rasgamento .....	74

<b>5.5. GEOCOMPÓSITO .....</b>	<b>75</b>
5.5.1. INSPEÇÃO VISUAL .....	75
5.5.2. ENSAIOS REALIZADOS COM O GEOTÊXTIL DE PROTEÇÃO GTX400 .....	76
5.5.2.1. Ensaio de tração .....	76
5.5.2.2. Ensaio de punçoamento estático .....	77
5.5.2. ENSAIOS COM O GEOTÊXTIL DE PROTEÇÃO GTX300.....	79
5.5.3.1. Ensaio de tração .....	79
5.5.3.2. Ensaio de punçoamento estático .....	80
 <b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>81</b>
6.1. PRINCIPAIS CONCLUSÕES.....	81
6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....	82
 <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>83</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1 – Classificação dos geossintéticos .....	5
Fig. 2.2 – Ligação mecânica por agulhagem .....	6
Fig. 2.3 – Geomembranas lisas e texturadas.....	7
Fig. 2.4 – Processo de fabrico por calandragem: a) Esquema geral; b) Fabrico de geomembranas multicamadas .....	8
Fig. 2.5 – Geocompósitos: a) Bentonítico; b) Drenagem; c) Reforço.....	8
Fig. 2.6 – Processo de fabrico de geocompósitos bentoníticos: a) Camada de adesivo e bentonite; b) Agulhagem ou costura .....	9
Fig. 2.7 – Funções dos geossintéticos: a) Drenagem; b) Filtragem; c) Proteção; d) Reforço; e) Separação; f) Controlo de erosão superficial; g) Barreira de fluídos .....	10
Fig. 2.8 – Função de drenagem .....	10
Fig. 2.9 – Função de filtragem.....	11
Fig. 2.10 – Função de proteção .....	11
Fig. 2.11 – Função de reforço .....	12
Fig. 2.12 – Função de separação.....	12
Fig. 2.13 – Função de controlo de erosão superficial .....	12
Fig. 2.14 – Função de barreira de fluidos.....	13
Fig. 2.15 – Representação esquemática das principais aplicações de um geossintético.....	13
Fig. 2.16 – Aspeto geral das curvas força extensão de alguns geossintéticos .....	16
Fig. 2.17 – Sistema de impermeabilização de aterros com geossintéticos.....	19
Fig. 2.18 – Sistema composto simples em aterros de resíduos não perigosos .....	19
Fig. 2.19 – Sistema composto duplo em aterros de resíduos perigosos .....	20
Fig. 3.1 – Fatores que influenciam a danificação durante a instalação .....	22
Fig. 3.2 – Mecanismo de danificação: a) Abrasão; b) Punção; c) Rotura em tensão .....	23
Fig. 3.3 – Procedimento construtivo a adotar na aplicação dos geossintéticos: a) Preparação da superfície; b) Colocação do geossintético; c) Sobreposição de faixas; d) Colocação do material confinante; e) Espalhamento do material confinante; f) Compactação do material confinante .....	25
Fig. 4.1 – Diagrama do procedimento experimental .....	29
Fig. 4.2 – Geossintéticos utilizados no estudo: a) geotêxtil GTX300; b) geotêxtil GTX400; c) geomembrana; d) geocompósito bentonítico.....	30
Fig. 4.3 – Equipamento do ensaio de danificação mecânica: a) Vista geral do equipamento; b) Esquema representativo da caixa de danificação.....	32
Fig. 4.4 – Esquema do provete utilizado no ensaio de danificação mecânica.....	32
Fig. 4.5 – Base rígida .....	33

Fig. 4.6 – Base flexível de saibro: a) Compactação da primeira subcamada de saibro com índice de compactação de 50%; b) Preenchimento completo .....	33
Fig. 4.7 – Colocação dos provetes: a) Provede de geocompósito; b) Provede de geomembrana; c) Provede de geotêxtil; d) Vista geral dos provetes no equipamento .....	34
Fig. 4.8 – Ensaio de danificação mecânica: a) Enchimento da caixa superior; b) Caixa superior preenchida com agregado.....	35
Fig. 4.9 – Agregados usados no ensaio de danificação mecânica: a) <i>Corundum</i> ; b) RCD cerâmico, c) Brita 14/20 .....	36
Fig. 4.10 – Curvas granulométricas dos agregados.....	36
Fig. 4.11 – Solo usado na base flexível do ensaio de danificação mecânica: Saibro .....	37
Fig. 4.12 – Curvas granulométricas do solo utilizado na base flexível do ensaio de danificação mecânica .....	38
Fig. 4.13 – Provetes do ensaio de tração: a) Esquema do provede; b) Provede de GTX400; c) Provede de GCL.....	40
Fig. 4.14 – Ensaio de tração-extensão: a) Início do ensaio; b) Provede após o ensaio .....	40
Fig. 4.15 – Curvas força por unidade de largura - extensão dos cinco provedes de geotêxtil GTX400 e respetiva curva média .....	42
Fig. 4.16 – a) Esquema do provede utilizado; b) Provede de GMB; c) Craveira eletrônica .....	43
Fig. 4.17 – Ensaio de tração da GMB: a) Início do ensaio; b) Provede durante o ensaio; c) Rotura do provede .....	43
Fig. 4.18 – Curvas tensão-deformação dos cinco provedes de geomembrana .....	46
Fig. 4.19 – Provetes do ensaio de punção estático: a) Esquema do provede utilizado; b) Montagem do provede de GTX400 entre os anéis de aço .....	47
Fig. 4.20 – Ensaio de punção estático: a) Início do ensaio com o pilão encostado ao provede; b) Deformação do provede durante o ensaio.....	47
Fig. 4.21 – Curvas força-deslocamento dos cinco provedes intactos de geotêxtil GTX400 .....	48
Fig. 4.22 – Provetes do ensaio de rasgamento: a) Esquema do provede utilizado; b) Provede de geomembrana .....	49
Fig. 4.23 – Ensaio de rasgamento: a) Início do ensaio; b) Durante o ensaio; c) Rotura do provede.....	50
Fig. 5.1 – Geotêxtil não-tecido GTX400 no ensaio com base rígida: a) Intacto; b) Danificação com <i>corundum</i> ; c) Danificação com RCD cerâmico; d) Danificação com brita 14/20.....	52
Fig. 5.2 – Curvas médias força-extensão do geotêxtil GTX400 antes e após os ensaios de danificação mecânica na base rígida .....	53
Fig. 5.3 – Curvas médias força-deslocamento do geotêxtil GTX400 antes e após os ensaios de danificação mecânica na base rígida .....	54
Fig. 5.4 – Curvas médias força-extensão do geotêxtil GTX400 antes e após os ensaios de danificação mecânica na base flexível com índice de compactação de 50%.....	55

Fig. 5.5 – Curvas médias força-deslocamento do geotêxtil GTX400 antes e após os ensaios de danificação mecânica na base flexível com índice de compactação de 50% .....	56
Fig. 5.6 – Curvas médias força-extensão do geotêxtil GTX400 antes e após os ensaios de danificação mecânica na base flexível com índice de compactação de 80% .....	58
Fig. 5.7 – Resistência à tração residual do geotêxtil GTX400 nas diferentes bases de ensaio .....	58
Fig. 5.8 – Curvas médias força-deslocamento do geotêxtil GTX400 antes e após os ensaios de danificação mecânica na base flexível com índice de compactação de 80% .....	60
Fig. 5.9 – Resistência ao punçoamento residual do geotêxtil GTX400 nas diferentes bases de ensaio .....	60
Fig. 5.10 – Geotêxtil não-tecido GTX300 no ensaio com base rígida: a) Intacto; b) Danificação com corundum; c) Danificação com RCD cerâmico; d) Danificação com brita 14/20 .....	61
Fig. 5.11 – Curvas médias força-extensão do geotêxtil GTX300 antes e após os ensaios de danificação mecânica na base rígida .....	62
Fig. 5.12 – Curvas médias força-deslocamento do geotêxtil GTX300 antes e após os ensaios de danificação mecânica na base rígida .....	63
Fig. 5.13 – Geotêxtil não-tecido GTX300 ensaiado isoladamente na base rígida: a) Intacto; b) Danificação com corundum; c) Danificação com RCD cerâmico; d) Danificação com brita 14/20 .....	64
Fig. 5.14 – Curvas médias força-extensão do geotêxtil GTX300 danificado na base rígida (ensaio de danificação realizado apenas com o geotêxtil) .....	65
Fig. 5.15 – Resistências à tração residual dos diferentes geotêxteis .....	66
Fig. 5.16 – Curvas médias força-deslocamento do geotêxtil GTX300 antes e após os ensaios de danificação mecânica na base rígida (ensaio de danificação realizado apenas com o geotêxtil) .....	67
Fig. 5.17 – Resistências ao punçoamento residual dos diferentes geotêxteis .....	68
Fig. 5.18 – Geomembrana no ensaio com base rígida e geotêxtil de proteção GTX400: a) Intacto; b) Danificação com <i>corundum</i> ; c) Danificação com RCD cerâmico; d) Danificação com brita 14/20 ...	69
Fig. 5.19 – Resistências ao punçoamento residual da geomembrana com os geotêxteis de proteção GTX400 e GTX300 .....	74
Fig. 5.20 – Resistências ao rasgamento residual da geomembrana com os geotêxteis de proteção GTX400 e GTX300 .....	75
Fig. 5.21 – Geocompósito no ensaio com base rígida e geotêxtil de proteção GTX400: a) Intacto; b) Danificação com <i>corundum</i> .....	75
Fig. 5.21 (cont.) – Geocompósito no ensaio com base rígida e geotêxtil de proteção GTX400: c) Danificação com RCD cerâmico; d) Danificação com brita 14/20 .....	76
Fig. 5.22 – Curvas médias força-extensão do geocompósito GCL antes e após os ensaios de danificação mecânica (ensaio de danificação realizado com GTX400, GMB e GCL) .....	77
Fig. 5.23 – Curvas médias força-deslocamento do geocompósito GCL antes e após os ensaios de danificação mecânica (ensaio de danificação realizado com GTX400, GMB e GCL) .....	78
Fig. 5.24 – Curvas médias força-extensão do geocompósito GCL antes e após os ensaios de danificação mecânica (ensaio de danificação realizado com GTX300, GMB e GCL) .....	79

Fig. 5.25 – Curvas médias força-deslocamento do geocompósito GCL antes e após os ensaios de danificação mecânica (ensaio de danificação realizado com GTX300, GMB e GCL) .....80

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1– Matérias-primas utilizadas no fabrico de geossintéticos .....	5
Tabela 2.2 – Relações entre funções e materiais .....	10
Tabela 2.3 – Propriedades dos geossintéticos .....	14
Tabela 2.4– Densidade relativa de polímeros .....	15
Tabela 4.1– Valores obtidos na determinação da espessura .....	31
Tabela 4.2 – Valores obtidos na determinação MUA.....	31
Tabela 4.3 – Características dos agregados de danificação .....	37
Tabela 4.4– Características do solo utilizado na base flexível do ensaio de danificação .....	38
Tabela 4.5 – Plano dos ensaios realizados na dissertação .....	35
Tabela 4.6 – Ensaios de avaliação da danificação .....	39
Tabela 4.7 – Resultados obtidos no ensaio de tração do geotêxtil GTX400 (amostra de referência) ..	41
Tabela 4.8 – Determinação da área de secção média.....	44
Tabela 4.9 – Determinação da tensão de cedência (amostras de referência).....	45
Tabela 4.10 – Resultados obtidos no ensaio de tração da GMB em cedência e rotura (amostra de referência) .....	45
Tabela 4.11 – Resultados obtidos no ensaio de punçoamento estático do geotêxtil GTX400 (amostra de referência) .....	48
Tabela 4.12 – Resultados obtidos no ensaio de rasgamento da geomembrana (amostra de referência) .....	50
Tabela 5.1 – Valores obtidos nos ensaios de tração do geotêxtil GTX400 antes e após os ensaios de danificação mecânica na base rígida .....	52
Tabela 5.2 – Valores obtidos nos ensaios de punçoamento estático do geotêxtil GTX400 antes e após os ensaios de danificação mecânica na base rígida .....	54
Tabela 5.3 – Valores obtidos nos ensaios de tração do geotêxtil GTX400 antes e após os ensaios de danificação mecânica na base flexível com índice de compacidade de 50% .....	55
Tabela 5.4 – Valores obtidos nos ensaios de punçoamento estático do geotêxtil GTX400 antes e após os ensaios de danificação mecânica na base flexível com índice de compacidade de 50% .....	56
Tabela 5.5 – Valores obtidos nos ensaios de tração do geotêxtil GTX400 antes e após os ensaios de danificação mecânica na base flexível com índice de compacidade de 80% .....	57
Tabela 5.6 – Valores obtidos nos ensaios de punçoamento estático do geotêxtil GTX400 antes e após os ensaios de danificação mecânica na base flexível com índice de compacidade de 80% .....	59
Tabela 5.7 – Valores obtidos nos ensaios de tração do geotêxtil GTX300 antes e após os ensaios de danificação mecânica na base rígida .....	62
Tabela 5.8 – Valores obtidos nos ensaios de punçoamento estático do geotêxtil GTX300 antes e após os ensaios de danificação mecânica na base rígida .....	63

Tabela 5.9 – Valores obtidos nos ensaios de tração do geotêxtil GTX300 antes e após os ensaios de danificação mecânica na base rígida (ensaio de danificação realizado apenas com o geotêxtil) ...	65
Tabela 5.10 – Valores obtidos nos ensaios de punçoamento estático do geotêxtil GTX300 antes e após os ensaios de danificação mecânica na base rígida (ensaio de danificação realizado apenas com o geotêxtil) .....	67
Tabela 5.11 – Valores obtidos nos ensaios de tração da geomembrana antes e após os ensaios de danificação mecânica (ensaio de danificação realizado com GTX400, GMB e GCL) .....	70
Tabela 5.12 – Valores obtidos nos ensaios de punçoamento estático da geomembrana antes e após os ensaios de danificação mecânica (ensaio de danificação realizado com GTX400, GMB e GCL) .....	71
Tabela 5.13 – Valores obtidos nos ensaios de rasgamento da geomembrana antes e após os ensaios de danificação mecânica (ensaio de danificação realizado com GTX400, GMB e GCL) .....	72
Tabela 5.14 – Valores obtidos nos ensaios de tração da geomembrana antes e após os ensaios de danificação mecânica (ensaio de danificação realizado com GTX300, GMB e GCL) .....	73
Tabela 5.15 – Valores obtidos nos ensaios de punçoamento estático da geomembrana antes e após os ensaios de danificação mecânica (ensaio de danificação realizado com GTX300, GMB e GCL) .....	73
Tabela 5.16 – Valores obtidos nos ensaios de rasgamento da geomembrana antes e após os ensaios de danificação mecânica (ensaio de danificação realizado com GTX300, GMB e GCL) .....	74
Tabela 5.17 – Valores obtidos nos ensaios de tração do geocompósito antes e após os ensaios de danificação mecânica (ensaio de danificação realizado com GTX400, GMB e GCL) .....	76
Tabela 5.18 – Valores obtidos nos ensaios de punçoamento estático do geocompósito com o geotêxtil de proteção GTX400 antes e após os ensaios de danificação mecânica .....	78
Tabela 5.19 – Valores obtidos nos ensaios de tração do geocompósito antes e após os ensaios de danificação mecânica (ensaio de danificação realizado com GTX300, GMB e GCL) .....	79
Tabela 5.20 – Valores obtidos nos ensaios de punçoamento estático do geocompósito com o geotêxtil de proteção GTX300 antes e após os ensaios de danificação mecânica .....	80



## **SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS**

A - Área

ASTM - *American Society for Testing Materials*

B – Largura nominal dos provetes do ensaio de tração em tiras largas

BF 50 – Base flexível com índice de compactação de 50%

BF 80 – Base flexível com índice de compactação de 80%

BR – Base rígida

CPE – Clorinados

$C_C$  – Coeficiente de curvatura

$C_u$  – Coeficiente de uniformidade

C&DW – Construction and demolition waste

DDI – Danificação durante a instalação

$D_{máx}$  – Dimensão máxima das partículas

$D_x$  – Dimensão da amostra em que x% é inferior a essa mesma dimensão

$e_{max}$  - Índice de vazios máximo

$e_{min}$  - Índice de vazios mínimo

ETAR – Estação de tratamento de águas residuais

F – Força máxima de tração

$F_P$  – Força máxima de punçoamento

$F_R$  – Força máxima de rasgamento

GCL – Geocompósito bentonítico

GMB - Geomembrana

GTX – Geotêxtil

ID – Índice de compactação

$h_P$  – Deslocamento na força de punçoamento máxima

MUA – Massa por unidade de área

PA – Poliamidas

PE – Poliéster

PEAD – Polietileno de alta densidade

PECS – Polietilenos clorossulfonados

PET – Polietileno

PP – Polopropileno

PVC – Policloreto de vinilo

RCD – Resíduo de construção e demolição

RPR – Resistência ao punçoamento residual

RRR – Resistência ao rasgamento residual

RTR – Resistência à tração residual

T – Resistência à tração

$w_L$  - Limite de liquidez

$w_{ótimo}$  - Teor de água ótimo

$\gamma_{dmax}$  - Peso volúmico seco máximo

$\gamma_{dmin}$  - Peso volúmico seco mínimo

$\varepsilon_{FM}$  – Extensão na força máxima

FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

IGS – Sociedade Internacional de Geossintéticos

LGS – Laboratório de Geossintéticos

Fig. - Figura

# 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Os geossintéticos são materiais cujo uso é cada vez mais frequente em obras de engenharia civil. A preferência destes materiais deve-se à sua variedade e versatilidade de aplicação em diversas estruturas, entre as quais a construção de aterros para deposição de resíduos. Outros fatores a ter em conta na preferência dos geossintéticos incluem a facilidade e rapidez na aplicação, o custo reduzido comparativamente a outros métodos tradicionais e a possibilidade da construção em solos com características menos desejáveis, evitando o dimensionamento de estruturas complexas.

Apesar de toda a variedade e versatilidade característica destes materiais, as questões relacionadas com a durabilidade dos geossintéticos ainda suscitam algumas questões após a implementação dos mesmos em obras. Pela mesma razão, o número de estudos realizados nesta área tem sido mais significativo nos últimos anos. Existe uma necessidade em manter a confiança na indústria da construção e a minimização dos riscos de falha prematura é feita através do dimensionamento com recurso a métodos conservativos e a coeficientes de segurança (que representam diversos agentes e mecanismos de degradação). De modo a garantir o bom funcionamento dos geossintéticos é essencial perceber as condições a que estão sujeitos. Devido ao facto dos materiais poderem sofrer uma redução de resistência, o dimensionamento terá de ser efetuado prevendo danos que podem ocorrer a curto e a longo prazo.

Nos aterros de resíduos, a prevenção da danificação dos geossintéticos a implementar é essencial para o bom funcionamento da obra e para evitar a contaminação do solo e das águas freáticas. Para isso é necessário que os geossintéticos apresentem a resistência aos processos de instalação necessária para que as suas funções não sejam comprometidas. Neste trabalho foi avaliado o efeito da danificação mecânica sob carga repetida no comportamento a curto prazo de sistemas de impermeabilização de aterros de resíduos (combinação de um geotêxtil não-tecido, uma geomembrana e um geocompósito).

### 1.2. OBJETIVOS DO TRABALHO

O principal objetivo deste trabalho consistiu na avaliação da resistência à danificação mecânica sob carga repetida de um sistema de impermeabilização de um aterro de resíduos. Para além disso, foi estudada a influência da massa por unidade de área (MUA) do geotêxtil na proteção da geomembrana e o efeito da base do ensaio de danificação mecânica nos geossintéticos. A escolha dos agregados para o ensaio de danificação mecânica permitiu determinar quais os agregados menos danosos para o sistema de impermeabilização.

De modo a aprofundar o estudo, foi efetuado o mesmo ensaio de danificação com um geotêxtil não-tecido isoladamente. Após este processo, os danos foram avaliados qualitativamente (inspeção visual) e quantitativamente (ensaios mecânicos). A análise quantitativa incluiu ensaios de tração, punçoamento estático e rasgamento (apenas para a geomembrana). Para verificar as variações das propriedades mecânicas, os resultados foram comparados com os valores das amostras de referência (provetes intactos).

### **1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO**

Esta dissertação está dividida em seis capítulos, sendo que o presente capítulo é uma breve introdução ao tema e aos objetivos deste trabalho.

O capítulo 2 inclui alguns conceitos sobre geossintéticos e aterros de resíduos. É apresentada a classificação dos diversos geossintéticos, materiais constituintes e processos de fabrico, funções e algumas aplicações destes materiais. No final do capítulo faz-se uma breve abordagem aos aterros de resíduos e à sua impermeabilização.

O capítulo 3 é referente à danificação mecânica dos geossintéticos, nomeadamente à danificação durante a instalação, e são apresentados os modos de minimização dos seus efeitos e os métodos de simulação da mesma. Também é feita uma revisão bibliográfica sobre trabalhos de danificação mecânica realizados previamente.

No capítulo 4 são apresentados os geossintéticos em estudo e está descrito todo o procedimento experimental realizado na dissertação, tanto para o ensaio de danificação mecânica sob carga repetida, como para os ensaios de caracterização mecânica dos geossintéticos (ensaio de tração, ensaio de punçoamento estático e ensaio de rasgamento). São também apresentados exemplos de tratamento de dados para amostras de referência.

No capítulo 5 estão apresentados e discutidos todos os resultados provenientes dos ensaios experimentais para cada geossintético.

Por último, no capítulo 6 apresentam-se as principais conclusões do estudo, assim como possíveis desenvolvimentos futuros.

# 2

## GEOSSINTÉTICOS

### 2.1. INTRODUÇÃO

A tentativa de reforçar e melhorar o comportamento dos solos com a adição de materiais foi feita antes dos primeiros registros de qualquer procedimento experimental. As primeiras tentativas para estabilizar terrenos pantanosos usaram madeira, raízes e pequenos arbustos, entre outros. Desse modo, o material fibroso era interligado ao solo, formando uma camada resistente e com propriedades adequadas para o propósito pretendido. Desde essa época, 3000 AC, a estabilização de solos foi baseada em procedimentos de tentativa-erro devido à degradação da madeira ao longo do tempo. Por esse motivo, optaram por introduzir nesses processos diferentes materiais como pedras e peles de animais (Koerner, 2012).

No século XX, a primeira referência à aplicação de telas (Estados Unidos, em 1926) como reforço de pavimentos de estradas consistiu na aplicação de uma tela de algodão sobre uma camada de subsolo, sendo colocado asfalto a temperaturas elevadas e posteriormente uma camada fina de areia sobre o mesmo. Após vários estudos sobre esse procedimento, verificou-se que até à deterioração da tela, a estrada apresentou boas condições e que a tela reduziu o aparecimento de fendas e irregularidades no terreno. Na década de 30, surgiu a ideia de criar uma barreira entre dois materiais com características diferentes, cujo objetivo seria a drenagem de água e filtragem (Koerner, 2012).

Contudo, as ideias e técnicas usadas nesses tempos eram dispendiosas e deram origem à redução dos recursos naturais exploráveis, começando a existir algumas preocupações de ordem econômica e ambiental. Essas preocupações levaram a um crescimento exponencial de novas técnicas e materiais a utilizar em obras de engenharia civil. A aplicação de geossintéticos tem sido cada vez mais frequente por serem materiais de fácil instalação e de baixo custo, que têm vindo a emergir na comunidade dos engenheiros civis após o aparecimento dos polímeros sintéticos na década de 40, associado ao desenvolvimento das técnicas utilizadas no fabrico de geotêxteis tecidos (década de 50) e não-tecidos (década de 60).

As barreiras de impermeabilização que previnem a movimentação de fluidos e gases de uma determinada área de contenção sofreram uma evolução ao longo dos anos. Os revestimentos inicialmente eram feitos a partir de argila com baixa permeabilidade e, na década de 30, as barreiras poliméricas foram criadas com a introdução de um material de borracha sintética. Atualmente, os materiais utilizados são combinações de geossintéticos e bentonite (Koerner, 2012).

A crescente utilização de geossintéticos a nível mundial é vantajosa para empreiteiros, projetistas e donos de obra. Os empreiteiros têm interesse nas construções mais rápidas e menos dependentes das condições meteorológicas, na redução dos volumes de terra movimentados e na possibilidade de usar

solos de pior qualidade, enquanto que os projetistas apreciam a uniformidade dos materiais, a sua fácil colocação e a capacidade que estes têm de mitigar defeitos pontuais do solo. Para os donos de obra a redução de custos de construção e manutenção é o fator mais importante no uso de geossintéticos (Jewell, 1996).

De acordo com a Sociedade Internacional de Geossintéticos (IGS), um geossintético é um material polimérico, natural ou sintético, usado em contacto com materiais naturais, como solo ou rocha, ou qualquer outro material geotécnico utilizado em aplicações de engenharia civil. Atualmente os geossintéticos são produtos maioritariamente sintéticos, uma vez que o uso de materiais com fibras naturais é cada vez mais raro devido à suscetibilidade à biodegradação e por não possuírem propriedades adequadas a um grande número de aplicações (Pinho-Lopes e Lopes, 2010).

Neste capítulo serão descritos os geossintéticos relativamente à classificação, materiais constituintes e processos de fabrico, assim como as suas funções e propriedades. Também será feita uma introdução a aterros de resíduos e à sua impermeabilização com recurso a geossintéticos.

## **2.2. MATERIAIS CONSTITUINTES**

As matérias-primas utilizadas na indústria têxtil dividem-se em dois grandes grupos: naturais e químicas. Enquanto que as matérias-primas naturais podem ter origem vegetal (juta, algodão, linho e cânhamo) e animal (lã e seda), as matérias-primas químicas dividem-se em orgânicas (polímeros naturais transformados e polímeros sintéticos) e inorgânicas (minerais e metais). As fibras naturais são biodegradáveis e não possuem propriedades adequadas para um grande número de aplicações, pelo que o seu uso é cada vez mais raro. As fibras químicas orgânicas, mais utilizadas no fabrico de geossintéticos, são materiais provenientes do petróleo, usualmente designados como plásticos. Os plásticos podem dividir-se em termoplásticos e plásticos termoendurecidos. A diferença entre estes é que os termoplásticos podem amolecer e endurecer por aquecimento e arrefecimento, respetivamente, e os plásticos termoendurecidos quando endurecem, partindo do estado fundido, não podem amolecer por ação do calor. Os termoplásticos são os materiais mais utilizados no fabrico de geossintéticos (Pinho-Lopes e Lopes, 2010).

O comportamento de um polímero é muito dependente não só do peso molecular como também da sua cristalinidade. Assim sendo, o aumento do peso molecular resulta num aumento da elongação e da resistência à tração, ao impacto, à fendilhação e ao calor, enquanto conduz à diminuição da fluência e da trabalhabilidade do material. Por outro lado, a diminuição do peso molecular contribui para o aumento da resistência ao impacto e para a diminuição da resistência à fluência, da trabalhabilidade e das propriedades hidráulicas (Koerner, 1999). A cristalinidade é outra propriedade determinante no comportamento dos polímeros, podendo os polímeros ser classificados em amorfos e semicristalinos. O aumento desta propriedade leva ao aumento da rigidez do polímero, da resistência química, ao calor e à tração e, conseqüentemente à diminuição da permeabilidade, da deformação na rotura, da flexibilidade e da resistência ao impacto e à fendilhação.

Os principais polímeros utilizados no fabrico dos geossintéticos são os poliésteres (PET), polipropileno (PP), polietileno (PE), polietilenos clorinados (CPE), polietilenos clorossulfonados (PECS), poliamidas (PA), policloreto de vinilo (PVC), etc (Shukla, 2002). Na Tabela 2.1 encontram-se algumas das matérias-primas usadas no fabrico de geossintéticos.

Tabela 2.1– Matérias-primas utilizadas no fabrico de geossintéticos (adaptado de Shukla, 2002)

Geossintéticos	Matérias-primas
Geotêxteis	PP, PET, PA, PE
Geogrelhas	PE, PET, PP
Georredes	PE
Geomembranas	PE, PVC, CPE, PECS

### 2.3. CLASSIFICAÇÃO DOS GEOSSINTÉTICOS

Os geossintéticos são, maioritariamente, elementos obtidos a partir de polímeros sintéticos que se colocam à superfície ou no interior de obras geotécnicas, podendo desempenhar diversas funções. As propriedades dos geossintéticos são influenciadas pelo tipo de polímero constituinte, porém a sua classificação está baseada nas diferenças estruturais provenientes dos diferentes tipos de fabrico.

Numa primeira aproximação, com base na sua estrutura (Fig. 2.1), os geossintéticos podem ser divididos em impermeáveis e permeáveis. O grupo dos permeáveis é constituído por geotêxteis e produtos relacionados como geogrelhas, georredes, geocompósitos e outros. As geomembranas pertencem aos geossintéticos impermeáveis.

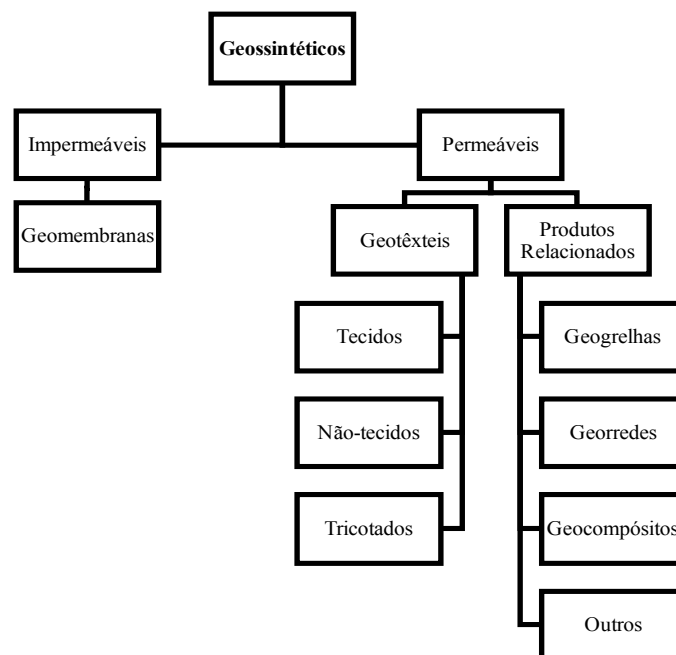


Fig. 2.1 – Classificação dos geossintéticos

De modo a diferenciar cada tipo de geossintéticos, os seus processos de fabrico poderão ser divididos em três passos:

- 1º - Produção do polímero com os seus vários aditivos;
- 2º - Produção dos componentes;
- 3º - Conversão dos componentes no geossintético.

Neste trabalho serão descritos os processos de fabrico dos geossintéticos utilizados como impermeabilização de um aterro de resíduos, ou seja, os geotêxteis, geomembranas e geocompósitos bentoníticos.

### 2.3.1. GEOTÊXTEIS

Os geotêxteis são, geralmente, produtos poliméricos permeáveis em forma de manta flexível e, dependendo do processo de fabrico, podem ser divididos em tecidos, não-tecidos e tricotados. Os geotêxteis tecidos são fabricados através de processos convencionais de tecelagem e, normalmente, são compostos por fios perpendiculares e interlaçados de modo a formar uma malha com espessura reduzida e uma distribuição de poros regular. Os geotêxteis não-tecidos são constituídos por monofilamentos contínuos ou fibras dispostos aleatoriamente numa malha solta de espessura superior ao produto final e, posteriormente, são ligados mecânica, térmica e quimicamente. Estes geotêxteis possuem uma estrutura plana e uma distribuição de poros aleatória.

A ligação mecânica, também conhecida como agulhagem, consiste na passagem da malha através de milhares de agulhas e farpas em movimento contínuo, arrastando alguns componentes e entrelaçando-os (Fig. 2.2). Os geotêxteis resultantes deste processo são designados como não-tecidos agulhados.

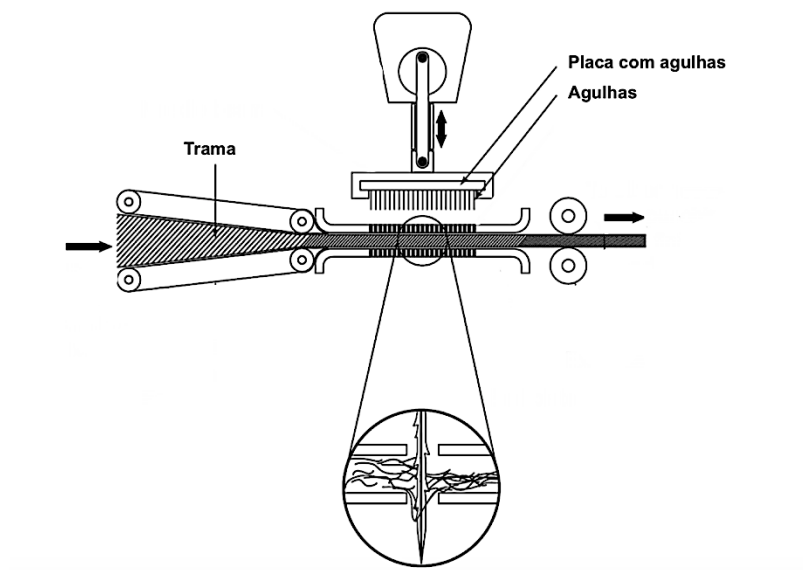


Fig. 2.2 – Ligação mecânica por agulhagem (adaptado de Koerner, 2016)

A ligação térmica é feita por aquecimento da malha. Se o material produzido for proveniente do mesmo tipo de polímero, a ligação é feita por calandragem a temperaturas elevadas, aplicada apenas nos pontos a ligar a malha. No caso de geotêxteis produzidos com filamentos de dois ou mais tipos de polímeros, existem vários pontos de fusão diferentes, originando uma ligação por fusão nos pontos de contacto entre componentes. A este processo é atribuída a designação de geotêxteis não-tecidos termossoldados. De acordo com Pinho-Lopes (2004) a ligação entre fibras termicamente é limitada pela espessura crescente do material. Se o material estiver sujeito a uma temperatura suficiente para que haja fusão das fibras internas de uma malha com grande espessura, as fibras exteriores vão fundir devido ao sobreaquecimento. No entanto, se a temperatura não for suficiente para chegar ao centro da malha, a ligação obtida pode conduzir à laminação do material durante o período de utilização.



A ligação química é efetuada através da impregnação ou pulverização de agentes ligantes químicos, como cola, resina e derivados, passando depois por um período de cura ou processos de calandragem para que se dê a ligação entre os constituintes. Esta ligação é, em alguns casos, utilizada de modo a complementar a ligação feita por agulhagem. Os geotêxteis obtidos por este processo são designados de não-tecidos ligados quimicamente.

Os geotêxteis tricotados são produzidos entrelaçando os fios para que seja possível a formação de uma estrutura plana. O uso destes geotêxteis é evitado uma vez que sofrem bastante deformação quando é aplicada carga. A solução deste problema consiste na introdução de fios de elevada resistência e deformações reduzidas na direção longitudinal.

### 2.3.2. GEOMEMBRANA

As geomembranas são geossintéticos utilizados na retenção de gases e líquidos e podem ser divididas em dois tipos, de acordo com a sua superfície: texturadas (ou rugosas) e lisas (Fig. 2.3). As texturadas contêm saliências, geralmente produzidas a partir de geomembranas lisas que posteriormente é induzida uma textura e conduzem ao aumento do atrito na interface com outros materiais.

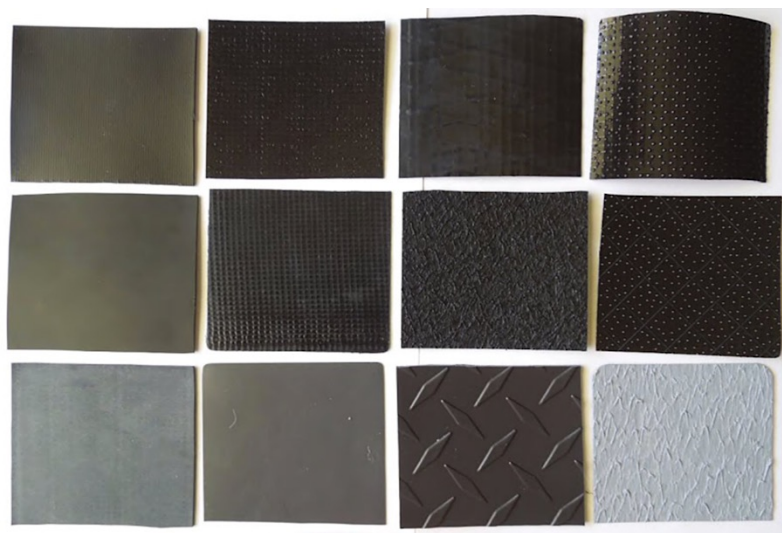


Fig. 2.3 – Geomembranas lisas e texturadas (Shukla, 2016)

Os métodos geralmente utilizados no fabrico das geomembranas são a extrusão, espalhamento superficial ou calandragem.

O processo mais simples para a produção de geomembranas é a extrusão, que consiste no fabrico de uma folha não reforçada devido à extrusão de polímero fundido e dos aditivos. As membranas podem ser reforçadas logo após a extrusão, aplicando um geotêxtil sobre a folha ainda quente, designando-se por geomembranas reforçadas e podem ser consideradas geocompósitos (Pinho-Lopes e Lopes, 2010).

A calandragem (passagem entre cilindros aquecidos de rotação contrária), na Fig. 2.4, é o processo mais utilizado no fabrico de geomembranas (Shukla, 2002), podendo-se fabricar geomembranas multicamadas. De modo a melhorar as propriedades mecânicas das geomembranas, este processo ocorre várias vezes após a extrusão. Caso seja necessário o reforço da geomembrana, é colocado um geotêxtil entre as duas camadas de plástico.

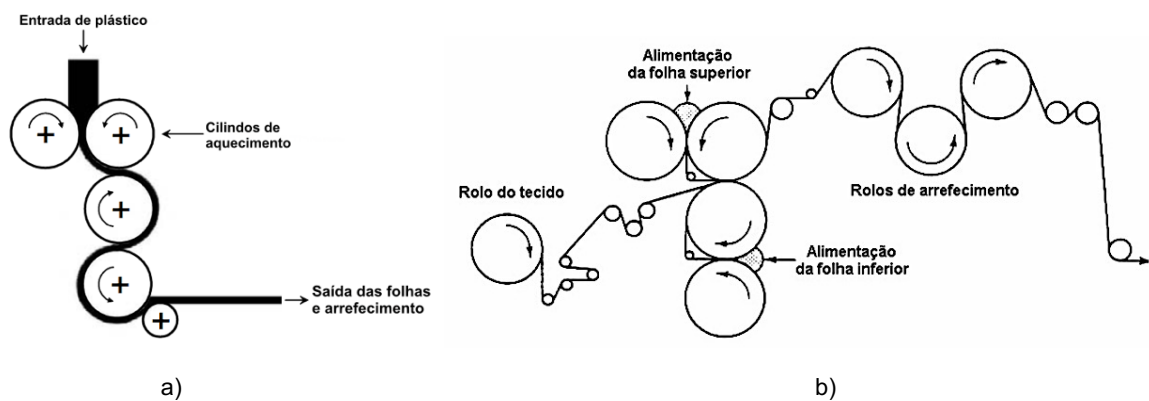


Fig. 2.4 – Processo de fabrico por calandragem (adaptado de Lopes, 1998): a) Esquema geral; b) Fabrico de geomembranas multicamadas

No processo de espalhamento superficial, um método mais recente, um polímero é espalhado sobre um geotêxtil, revestindo-o. As membranas resultantes deste método são membranas reforçadas. Para se produzir membranas não reforçadas, o geotêxtil é substituído por uma folha de papel que é removida no final do processo.

### 2.3.3. GEOCOMPÓSITOS

São designados geocompósitos as associações de diferentes materiais, incluindo pelo menos um geossintético. A função que cada um desempenha define a sua classificação, uma vez que a filosofia por trás destes materiais é a combinação das melhores características de diferentes elementos de forma a resolver problemas específicos de uma maneira ótima (Carvalho, 2014). Os geocompósitos mais comuns são os bentoníticos, os de drenagem e de reforço (Fig. 2.5).

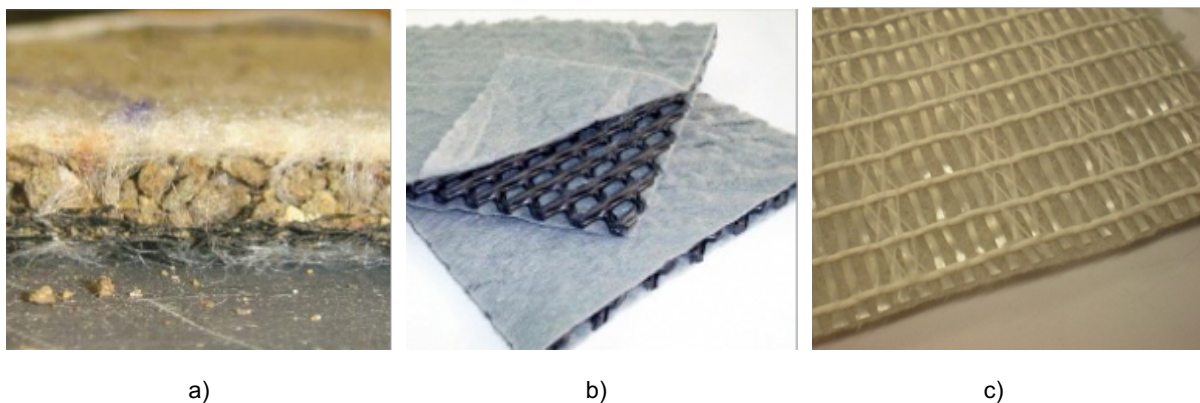


Fig. 2.5 – Geocompósitos: a) Bentonítico (Barbedo, 2013); b) Drenagem; c) Reforço (Carvalho, 2014)

Os geocompósitos bentoníticos (ou barreiras geossintéticas argilosas) são constituídos pela combinação de uma camada de bentonite com um geotêxtil ou geomembrana, sendo a sua ligação (Fig. 2.6) efetuada com cola (adesivo), por costura ou agulhagem (Lopes, 1998). Após o fabrico, os geocompósitos bentoníticos são enrolados e, posteriormente, cobertos por uma película de plástico de modo a evitar perdas de bentonite durante o transporte e a absorção de humidade no armazenamento.

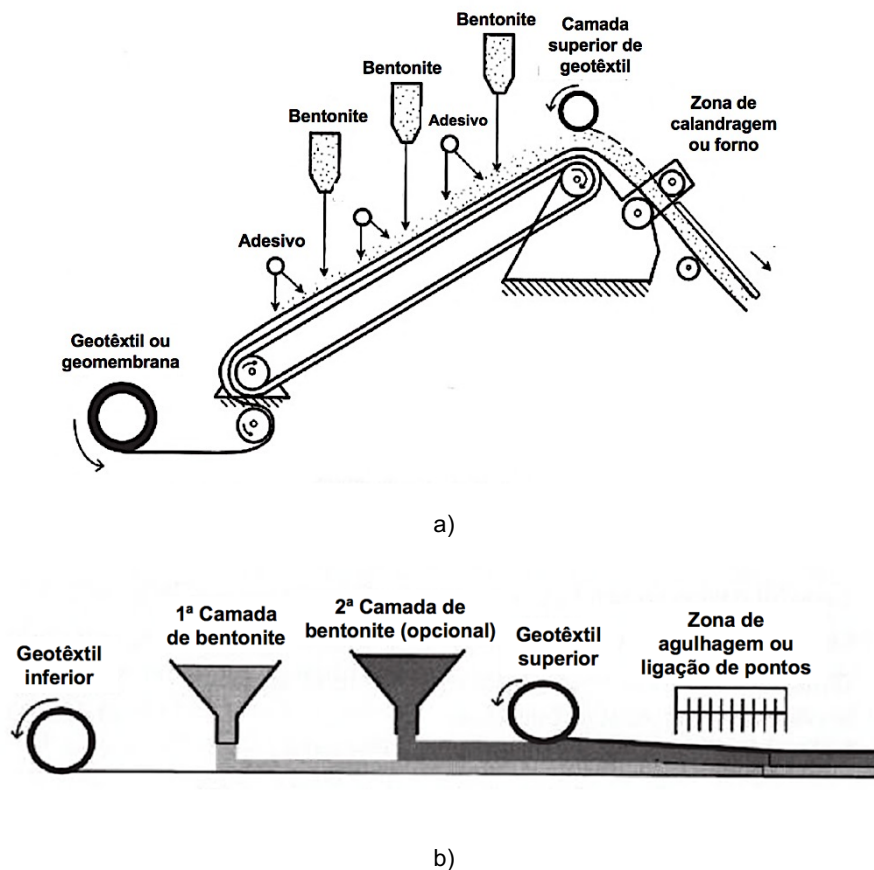


Fig. 2.6 – Processo de fabrico de geocompósitos bentoníticos (adaptado de Koerner, 2016): a) Camada de adesivo e bentonite; b) Agulhagem ou costura

Os geocompósitos drenantes representam a união de geotêxteis e georredes ou geotêxteis e núcleos poliméricos, em que o geotêxtil é o elemento de filtragem deste material. A união é feita por ligação térmica. Nos geocompósitos de reforço, os geotêxteis não-tecidos podem ser reforçados com fibras poliméricas, fibras de aramida, de vidro e de aço.

## 2.4. FUNÇÕES DOS GEOSSINTÉTICOS

O termo geossintético está associado a vários materiais com diferentes características e a uma grande versatilidade na sua aplicação por se adaptarem a diversas situações. A sua utilização é cada vez mais frequente como substituto de materiais de construção tradicionais (solo, brita, areia, enrocamento, grelhas de aço, condutas) ou como reforço dos materiais naturais.

Devido às várias funções que um geossintético pode desempenhar simultaneamente, é necessário que as mesmas sejam definidas de modo que seja possível estabelecer características que o material deverá possuir para o desempenho das funções para o qual foi dimensionado.

Segundo a norma NP EN ISO 10318: 2005, os geossintéticos podem desempenhar as funções de drenagem, filtragem, proteção, reforço, separação, controlo de erosão superficial e barreira de fluídos (Fig. 2.7). Para uma determinada aplicação, um geossintético poderá desempenhar mais do que uma função. Assim, na Tabela 2.2 estão resumidas as principais funções de diferentes tipos de geossintéticos.

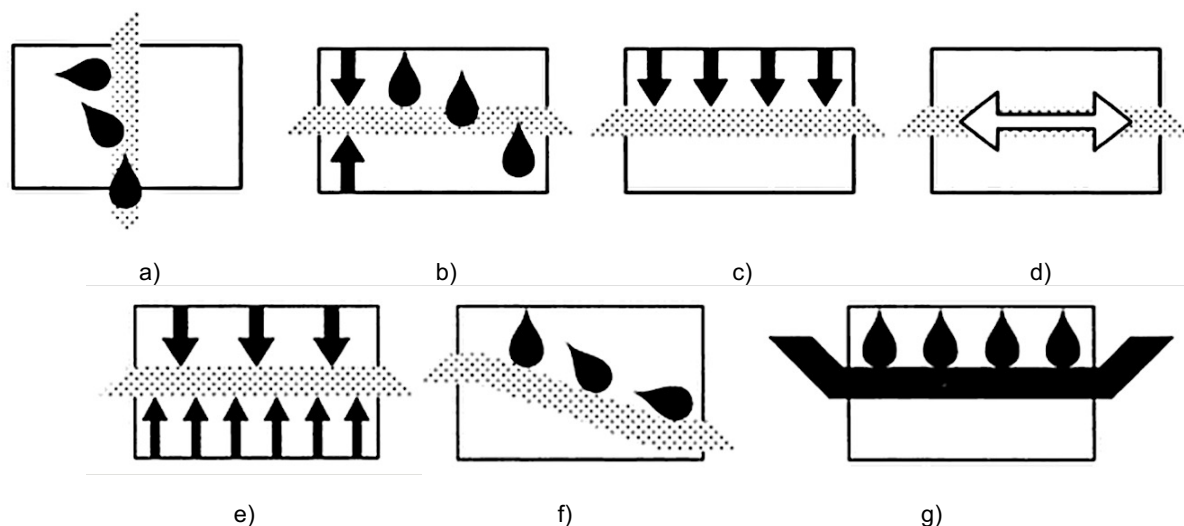


Fig. 2.7 – Funções dos geossintéticos (NP EN ISO 10318): a) Drenagem; b) Filtragem; c) Proteção; d) Reforço; e) Separação; f) Controle de erosão superficial; g) Barreira de fluidos

Tabela 2.2 – Relações entre funções e materiais (Ferreira, 2010)

Geossintéticos	Aplicação						
	Reforço	Filtragem	Drenagem	Proteção	Separação	Barreira de fluidos	Controle de erosão
Geogrelhas	✓						
Geomembranas					✓	✓	
Geocompósitos	✓		✓			✓	
Georredes			✓				
Geotêxteis	✓	✓	✓	✓	✓		✓

A função de drenagem (Fig. 2.8) tem por objetivo recolher e transportar águas pluviais, freáticas e/ou outros fluidos (líquidos ou gás) ao longo do plano do geossintético. De modo a evitar a entrada de partículas sólidas e o transporte das mesmas no interior do dreno, as suas aberturas deverão ter uma dimensão que impeça a passagem sem bloqueio ou colmatção. As propriedades que mais influenciam o eficaz funcionamento de um geossintético de drenagem são a transmissividade, a permeabilidade normal e a distribuição de poros (Pinho-Lopes e Lopes, 2010).

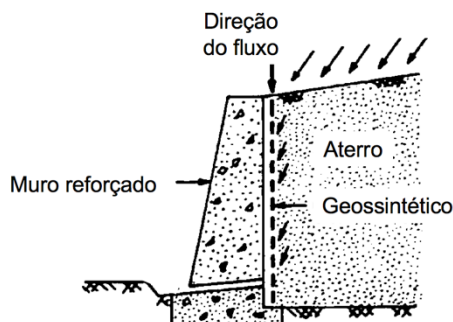


Fig. 2.8 – Função de drenagem (adaptado de Shukla, 2002)

A filtragem (Fig. 2.9) é a capacidade que o geossintético tem em permitir o fluxo livre do fluido, evitando a passagem e o arrastamento de partículas sólidas, perpendicularmente ao plano do geossintético. Para um desempenho eficaz, o geossintético deve possuir características hidráulicas e de dimensão de aberturas adequadas, como também possuir a flexibilidade necessária para que um bom ajustamento exista à superfície do maciço por ele protegido, evitando a criação de vazios entre o solo e o geossintético. Esta função pode ser desempenhada para evitar o arrastamento de partículas em suspensão de fluidos percolantes ou no interior de maciços terrosos, permitindo a passagem de água, mas retendo as partículas sólidas (Pinho-Lopes e Lopes, 2010).

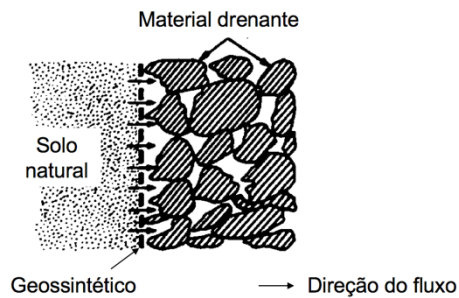


Fig. 2.9 – Função de filtragem (adaptado de Shukla, 2002)

A função de proteção (Fig. 2.10) consiste em evitar ou limitar a danificação local de um determinado elemento ou material através da utilização de um geossintético. Um geossintético pode desempenhar a função de proteção quando colocado entre dois materiais para reduzir ou impedir a danificação local do elemento a ser protegido, absorvendo e distribuindo as tensões e deformações a que se sujeita. Pode também ser colocado sobre o local a proteger, de modo a evitar que a ação de agentes atmosféricos ou do tráfego provoquem erosão (Ferreira, 2010).

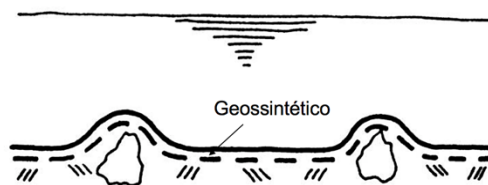


Fig. 2.10 – Função de proteção (adaptado de Ingold, 1994)

O reforço (Fig. 2.11) consiste na utilização do comportamento carga-extensão dos geossintéticos para melhorar as propriedades mecânicas de solo ou outros materiais de construção. Como os geossintéticos são materiais que resistem a esforços de tração, podem ser utilizados para complementar materiais que não possuam essa capacidade. A função de reforço pode ser desempenhada quando os geossintéticos são colocados entre duas camadas sujeitas a pressões diferentes e a sua tensão equilibra a diferença de pressões (ação mecânica de membrana) ou quando colocados no interior de maciços para suportar tensões de tração. Quando os geossintéticos exercem esta função, as suas propriedades mecânicas e a sua evolução no tempo são fundamentais (Pinho-Lopes e Lopes, 2010).

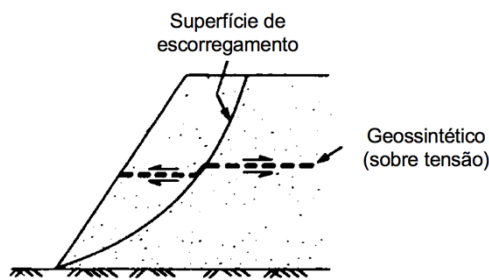


Fig. 2.11 – Função de reforço (adaptado de Shukla, 2002)

A função de separação (Fig. 2.12) consiste em evitar a mistura entre dois materiais adjacentes, solos e/ou materiais de aterro com diferentes características através da colocação de um geossintético entre eles, para que o funcionamento e a integridade dos dois materiais se mantenham intactos ou sejam melhorados, não permitindo que se misturem ou interpenetrem, sob a ação das cargas aplicadas (Pinho-Lopes e Lopes, 2010).

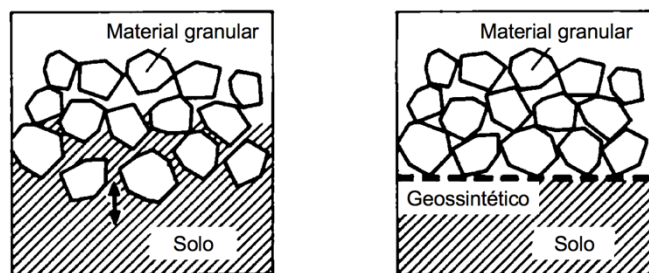


Fig. 2.12 – Função de separação (adaptado de Shukla, 2002)

O controlo de erosão superficial (Fig. 2.13) tem como objetivo evitar ou limitar os movimentos do solo ou de outras partículas na superfície de, por exemplo, um talude. Os geossintéticos são colocados sobre a superfície do terreno, protegendo-a da ação de agentes atmosféricos, tráfego, da ação erosiva da água, etc. O controlo pode ser efetuado de forma provisória (utilizando geossintéticos biodegradáveis até que a estrutura esteja consolidada pelo crescimento de vegetação) ou permanente (prevenção da erosão costeira) (Pinho-Lopes e Lopes, 2010).

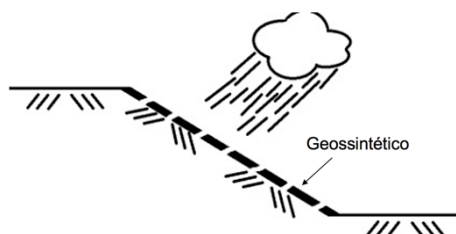


Fig. 2.13 – Função de controlo de erosão superficial (adaptado de Ingold, 1994)



Por último, a função de barreira de fluidos (Fig. 2.14) destina-se em utilizar um geossintético para evitar a migração de fluidos (líquidos ou gases). Quando os geossintéticos exercem esta função é muito importante que seja garantida a continuidade do material ao longo das operações de transporte, manuseamento e colocação. A resistência a possíveis ataques químicos e/ou biológicos que existam nos fluidos é uma característica necessária ao geossintéticos. Devido ao facto de serem colocados em obra em faixas com uma largura constante, a sua ligação é imprescindível para garantir a estanquidade da barreira (Pinho-Lopes e Lopes, 2010).

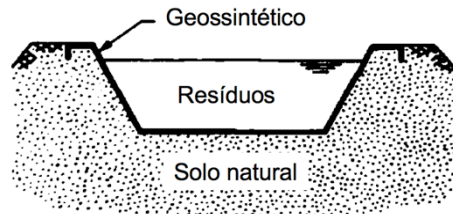


Fig. 2.14 – Função de barreira de fluidos (adaptado de Shukla, 2002)

## 2.5. APLICAÇÕES DOS GEOSSINTÉTICOS

Assim como os geossintéticos foram evoluindo ao longo do tempo, a sua utilização também teve um aumento na diversidade de aplicações. Na norma NP EN ISO 10318 são referidas as principais aplicações (Fig. 2.15).

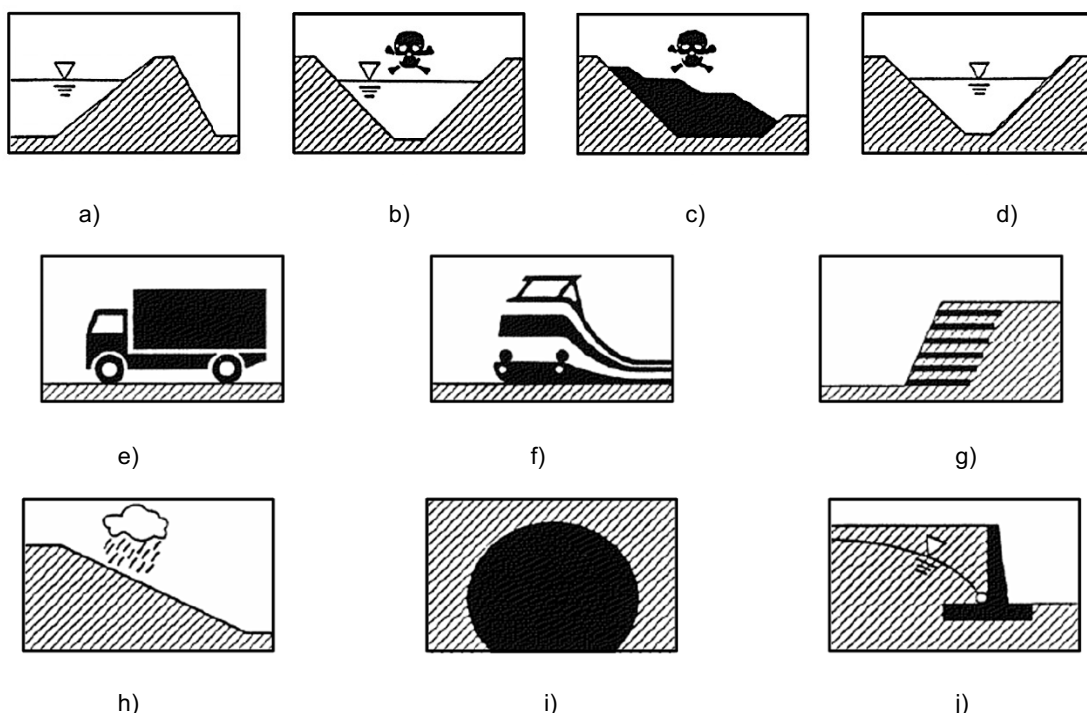


Fig. 2.15 – Representação esquemática das principais aplicações de um geossintético (EN ISO 10318 2005):  
a) Reservatórios e barragens; b) Depósitos de resíduos líquidos; c) Depósitos de resíduos sólidos; d) Canais;  
e) Obras rodoviárias; f) Obras ferroviárias; g) Funções e estruturas de suporte; h) Sistemas de controlo de erosão; i) Túneis e estruturas subterrâneas; j) Sistemas de drenagem

## 2.6. PROPRIEDADES DOS GEOSSINTÉTICOS

O processo de fabrico e o polímero constituinte são os principais fatores que afetam as propriedades dos geossintéticos. De modo que o geossintético satisfaça as funções para o qual foi dimensionado, tem que se garantir que as suas características ao longo da vida útil da obra são mantidas, prevendo as ações de manuseamento, armazenagem, transporte até à instalação em obra. As propriedades dos geossintéticos estão divididas em quatro grupos, nomeadamente, propriedades físicas, hidráulicas, mecânicas e relativas à durabilidade, estando resumidas na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Propriedades dos geossintéticos (Pinho-Lopes e Lopes, 2010)

Propriedades Físicas	Massa por unidade de área (MUA)
	Espessura
	Densidade relativa dos polímeros
	Distribuição e dimensão das partículas
Propriedades Hidráulicas	Transmissividade
	Permeabilidade à água normal ao plano
Propriedades Mecânicas	Comportamento à tração
	Resistência ao punçoamento
	Resistência ao rasgamento
	Atrito entre interfaces
Propriedades Relativas à Durabilidade	Resistência aos agentes de degradação
	Resistência durante o tempo de vida útil

### 2.6.1. PROPRIEDADES FÍSICAS

A massa por unidade de área (também conhecida por gramagem) é expressa em  $\text{g/m}^2$ . Esta propriedade é essencial na determinação do custo dos geossintéticos, a sua dispersão indica a homogeneidade do material e também pode indicar os valores de algumas propriedades mecânicas, tais como a resistência à tração e ao punçoamento estático (Carneiro, 2009). A massa por unidade de área é normalmente determinada de acordo com a NP EN ISO 9864: 2006, ASTM D5261-92: 2009 (para geotêxteis) ou NP EN 14196: 2007, ASTM D5993-14 (para geocompósitos).

A espessura é considerada a distância entre a superfície superior e inferior do geossintético, apresentada em mm. É um parâmetro que influencia diretamente o comportamento mecânico e hidráulico dos geossintéticos, como também permite avaliar a compressibilidade do material através de relações entre a espessura e a pressão. (Pinho-Lopes e Lopes, 2010). A caracterização desta propriedade é normalmente determinada através da NP EN ISO 9863-1: 2006 ou ASTM D5199-01: 2006.

A densidade relativa dos polímeros constituintes é designada como a razão entre a massa volúmica dos elementos constituintes e a massa volúmica da água a 4°C. Sendo um indicador do tipo de polímero, permite avaliar a capacidade do geossintético flutuar. As normas ASTM D792-08 e ASTM D1505-03



descrevem os procedimentos para a determinação desta propriedade. Na Tabela 2.4 estão representados os valores de densidade relativa dos polímeros habitualmente utilizados no fabrico de geossintéticos.

Tabela 2.4– Densidade relativa de polímeros (Shukla, 2002)

Polímero	Densidade relativa
PA	1,05 a 1,14
PE	0,90 a 0,96
PET	1,22 a 1,38
PP	0,91
PVC	1,69

A distribuição e dimensão de aberturas são características indispensáveis para o dimensionamento dos geossintéticos como filtro, sendo o seu diâmetro normalmente expresso em mm (ou  $\mu\text{m}$ ). Existem aberturas uniformes (georredes e geogrelhas) e aberturas irregulares, num intervalo de tamanhos (geotêxteis tecidos e não-tecidos) (Pinho-Lopes e Lopes, 2010). As normas que caracterizam as aberturas dos geossintéticos são EN ISO 12956: 1999 (peneiração húmida) e ASTM D4751: 2004 (peneiração seca).

#### 2.6.2. PROPRIEDADES HIDRÁULICAS

A transmissividade (ou permeabilidade à água no plano) é fundamental para o geossintético desempenhar a função de drenagem, uma vez que é a capacidade de permitir o escoamento de fluidos no próprio plano. Quanto maior a transmissividade, melhor o desempenho como dreno. Depende da espessura, da distribuição e da dimensão das aberturas dos geossintéticos e é proporcional ao caudal conduzido no seu plano (Ferreira, 2010). Todo o procedimento da determinação da transmissividade está descrito na norma NP EN ISO 12958: 2005.

A permeabilidade à água normal ao plano (permissividade) refere-se à capacidade que a água tem de atravessar o geossintético perpendicularmente ao seu plano, importante para a função de filtragem. A norma que determina o procedimento para a determinação da permissividade é a NP EN ISO 11058: 2003.

#### 2.6.3. PROPRIEDADES MECÂNICAS

As propriedades mecânicas são fundamentais quando os geossintéticos exercem a função de reforço. O comportamento à tração depende do polímero constituinte do geossintético, do tipo de ligação utilizado e do seu processo de fabrico. A resposta do geossintético quando sujeito a este tipo de esforços é caracterizada por uma curva que relaciona a força por unidade de largura com a extensão. A partir desta curva pode obter-se a força máxima por unidade de largura (resistência à tração, em kN/m), a extensão na força máxima (em %) e a razão entre a força por unidade de largura e a correspondente extensão, designada por módulo de rigidez (Pinho-Lopes e Lopes, 2010).

Na Fig. 2.16 estão representados os valores gerais de alguns geossintéticos determinados através de ensaios de tração.

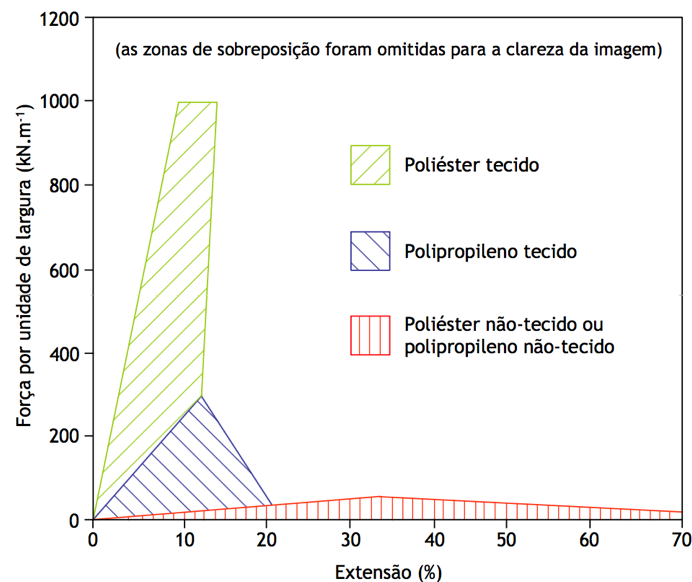


Fig. 2.16 – Aspeto geral das curvas força extensão de alguns geossintéticos (Carneiro, 2009)

A resistência ao punçoamento está associada à função de separação, permitindo avaliar a resistência dos geossintéticos a solicitações provocadas pelas partículas dos agregados. Durante a aplicação em obra, os geossintéticos estão sujeitos a compressões diferenciais ou a choques originados pela queda de materiais. A solicitação pode ser concentrada, estática ou dinâmica. Esta propriedade pode dividir-se em três tipos de mecanismos de penetração como a perfuração (ou golpe), punçoamento (efeito de compressão) e rebentamento. O resultado da resistência ao punçoamento pode ser um comprimento, uma força ou pressão, consoante o mecanismo responsável pelas solicitações a que o geossintético está sujeito (Pinho-Lopes e Lopes, 2010).

A resistência ao rasgamento é definida como a rotura progressiva resultante de duas ações, a perfuração (ação concentrada ou localizada) seguida de tração (ação distribuída) (Pinho-Lopes e Lopes, 2010).

A principal propriedade mecânica, quando um geossintético desempenha a função de reforço, é o atrito nas interfaces, devido à transferência de tensões existentes entre o reforço e o solo. A rugosidade e a capacidade de deformação do geossintético, a dimensão das aberturas e do material de aterro são fatores que fazem variar essa transferência (Ingold, 1994). A caracterização do atrito nas interfaces pode ser feita através do corte direto, do corte em plano inclinado ou de arranque.

#### 2.6.4. PROPRIEDADES RELATIVAS À DURABILIDADE

A durabilidade de um geossintético pode ser designada como a capacidade que o material tem em manter as propriedades que lhe são exigidas, ao longo de toda a sua vida útil. As propriedades relativas à durabilidade podem ser diferenciadas em dois tipos, as propriedades que contribuem para a resistência durante o tempo de vida útil e a resistência à degradação dos geossintéticos (Pinho-Lopes e Lopes, 2010).

A fluência e rotura em fluência, relaxação de tensões, abrasão e a fluência em compressão são as propriedades mais relevantes a avaliar na resistência durante o tempo de vida útil. Na avaliação da resistência à degradação dos geossintéticos, os aspetos importantes são a degradação fotoquímica, degradação química, degradação térmica e degradação biológica (Pinho-Lopes e Lopes, 2010).

## **2.7. ATERROS DE RESÍDUOS**

De modo a ter um enquadramento sobre o propósito do tema desta dissertação, neste ponto será feita uma breve introdução aos aterros de resíduos e ao sistema de impermeabilização dos mesmos.

### **2.7.1. CONCEITOS GERAIS**

Os aterros de resíduos são a solução utilizada para a deposição de resíduos nos arredores de uma comunidade. No passado, os resíduos eram depositados ao ar livre em locais afastados da sociedade, de modo a evitar problemas de saúde associados à sua decomposição. Um problema associado à deposição de resíduos à superfície era a contaminação do solo e dos aquíferos, devido à falta de impermeabilização e controlo dos lixiviados. Atualmente, os aterros de resíduos são obras de engenharia criadas para reduzir ao mínimo o efeito dos resíduos no meio ambiente, dependendo do sistema de impermeabilização e drenagem na base, taludes e cobertura final (Barroso et al., 2014).

Deste modo, os aterros de resíduos são uma componente necessária a qualquer sistema de gestão de resíduos municipal, uma vez que, apesar da redução de resíduos através da reciclagem, incineração e compostagem, ainda existe a necessidade de transportar materiais residuais para aterros.

O Decreto-lei 183/2009, no Artigo 10, classifica os aterros conforme a sua classe e divide-os em três categorias.

- Classe 1- Aterros para resíduos inertes;
- Classe 2- Aterros para resíduos não perigosos;
- Classe 3- Aterros para resíduos perigosos;

A classe 1, aterros para resíduos inertes, abrange todos os resíduos que não sofrem qualquer tipo de reação física ou química, não são solúveis nem inflamáveis e que não têm influências negativas em contacto com outras substâncias. Nos aterros para resíduos não perigosos (classe 2) estão incluídos os resíduos sólidos urbanos (RSU's) e os resíduos industriais banais (RIB). Os resíduos industriais perigosos (RIP) encontram-se em aterros da classe 3, podendo apresentar características patogénicas de inflamabilidade, reatividade, corrosividade e toxicidade.

Quando os resíduos sólidos iniciam o processo de decomposição, pela combinação de processos físicos, químicos e biológicos, dão origem à formação de lixiviados (estado líquido) e biogás (estado gasoso). Os lixiviados resultam da percolação da água ou outro líquido através do aterro de resíduos e a libertação de dióxido de carbono e de metano provenientes da decomposição dão origem ao biogás. É possível obter uma estimativa dos lixiviados produzidos através da realização de um balanço hídrico. A quantidade de lixiviado e biogás produzido depende de fatores como a precipitação, a temperatura, a infiltração de águas subterrâneas, o pH dos resíduos, o escoamento principal e o estado do terreno (Rhyner et al., 1995). Outros fatores, tais como a natureza dos resíduos (conteúdo em água dos resíduos) e o grau de compactação dos mesmos (quanto maior a compactação, menor a produção dos lixiviados) são indispensáveis para a estimativa da quantidade de lixiviados produzidos.

Por representarem o principal problema ambiental, os lixiviados devem ser retidos e enviados para uma estação de tratamento. Assim, é inserida uma camada drenante no fundo do aterro, normalmente constituída por materiais granulares, cujo objetivo é o transporte dos lixiviados para a rede de coletores. De modo a ser corretamente explorado, é necessário que o aterro possua (Costa, 2006):

- Rede de águas pluviais, uma vez que a infiltração de águas pluviais é um dos principais responsáveis do volume de lixiviados criado num aterro;
- Rede de drenagem de lixiviados e respetivo envio para estações de tratamento em estações de tratamento de águas residuais (ETAR);
- Rede de drenagem de biogás para diminuir os riscos devido à emissão de gases;
- Monitorização da qualidade das águas subterrâneas;

#### 2.7.2. SISTEMA DE IMPERMEABILIZAÇÃO DE ATERROS DE RESÍDUOS

O principal elemento do dimensionamento de um aterro de resíduos baseia-se num sistema de impermeabilização na base, laterais e, eventualmente, na cobertura do aterro, visto que o mesmo contém produtos da biodegradação e processos de degradação física e química dos resíduos. Antes da construção do sistema de impermeabilização é necessário proceder à regularização da zona basal e dos taludes, para que seja possível a colocação dos materiais, e a construção do sistema de drenagem. O tipo e requerimentos do sistema de impermeabilização dependem do tipo de resíduos depositados no aterro e têm o objetivo de prevenir a poluição do solo, das águas subterrâneas e superficiais, garantindo uma retenção eficiente dos lixiviados e o controlo da acumulação e migração do biogás (Williams, 2005).

Para que seja possível a impermeabilização do aterro, na parte inferior da camada drenante e em contacto com o terreno deve existir uma barreira impermeável. Essa barreira será composta por geossintéticos dispostos em uma ou mais camadas de impermeabilização, dependendo dos requisitos da obra onde vai ser implementado o sistema de impermeabilização.

O material fundamental utilizado em sistemas de impermeabilização de aterros são as geomembranas cujo objetivo é a retenção de gases e líquidos. No entanto, podem estar submetidas a vários agentes de degradação (ação dos lixiviados, biogás e temperaturas elevadas) que podem afetar e diminuir a sua durabilidade (Carneiro, 2009). O desempenho da geomembrana pode ser comprometido pela presença de orifícios provenientes de um processo construtivo inadequado ou pelos danos provocados pela ação de agentes de degradação físico-químicos. A presença desses orifícios intensifica a contaminação do solo e das águas subterrâneas, pelo que, após a colocação da camada drenante é necessário proceder à localização de orifícios na geomembrana (Barroso et al, 2014).

Assim, é indispensável que as geomembranas aplicadas nos aterros de resíduos possuam uma resistência elevada a diferentes fatores de degradação. Normalmente, a geomembrana é colocada entre um geocompósito bentonítico (com o princípio de na existência de um orifício na geomembrana, a bentonite em contacto com o lixiviado hidrata, expande e sela o orifício) e um geotêxtil de proteção (Fig. 2.17).

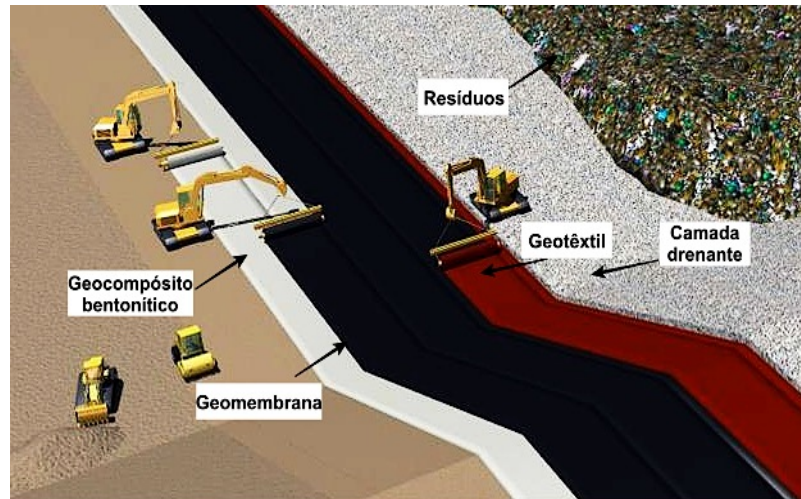


Fig. 2.17 – Sistema de impermeabilização de aterros com geossintéticos (adaptado da página da Internet da BBF)

Em aterros de resíduos não perigosos recorre-se ao uso de geossintéticos, como os geotêxteis (para proporcionar a proteção mecânica da geomembrana) e geocompósitos (com função de barreira de fluídos). O sistema de impermeabilização utilizado para os aterros não perigosos denomina-se como sistema composto simples e está esquematizado na Fig. 2.18.

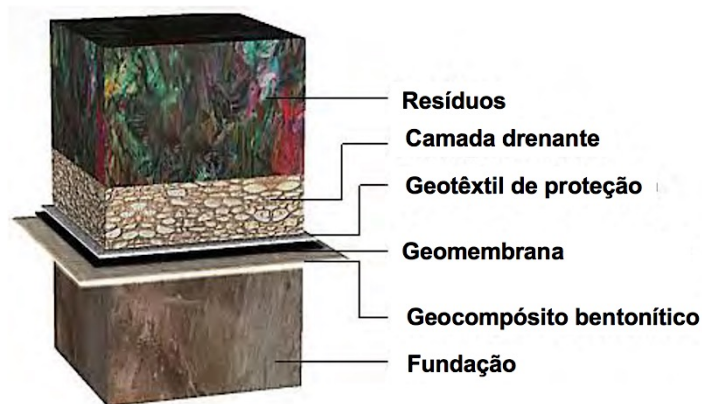


Fig. 2.18 – Sistema composto simples em aterros de resíduos não perigosos (adaptado de Duarte, 2009)

Para um aterro de resíduos perigosos o sistema de impermeabilização a utilizar é denominado como sistema composto duplo (Fig. 2.19). Este sistema é idêntico ao sistema composto simples, no entanto é utilizada uma dupla camada de geossintéticos, isto é, são implementados dois conjuntos (geotêxtil, geomembrana e geocompósito bentonítico) separados por um geocompósito drenante cuja função é a detecção de lixiviados e garantir a segurança perante contaminações. Como se tratam de resíduos que podem provocar maiores degradações nos materiais, é necessária a implementação de outra camada de geossintéticos, evitando assim a contaminação do solo e águas subterrâneas.

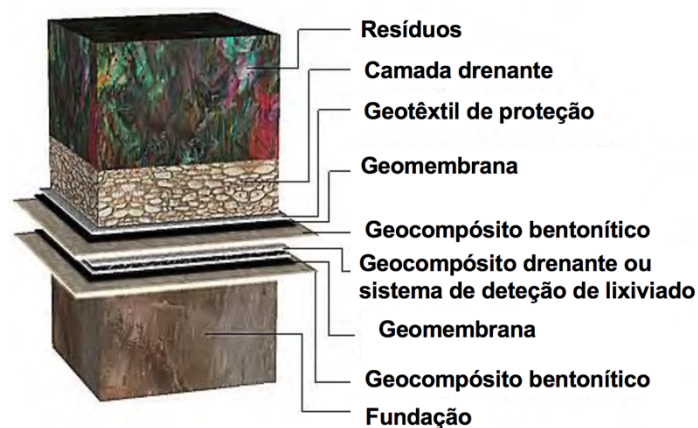


Fig. 2.19 – Sistema composto duplo em aterros de resíduos perigosos (adaptado de Duarte, 2009)

Para que se garanta a segurança do aterro, existem alguns critérios a ter em conta na aplicação destes sistemas de impermeabilização, entre os quais (Costa, 2006):

- A geomembrana deve ser sempre colocada sobre outra barreira (argilosa, bentonítica);
- Deve existir sempre uma camada protetora (geotêxtil) da geomembrana para que esta não sofra danificações devido à compactação da camada drenante;
- A camada drenante deve ter espessura suficiente para conduzir o caudal gerado;

Durante a implementação das camadas de um aterro de resíduos, existem alguns fatores que podem danificar os geossintéticos, principalmente pelas camadas adjacentes a esses materiais. Deste modo, para que a função do principal elemento do sistema de impermeabilização não seja comprometida, é necessário que a geomembrana resista ao processo de instalação e que não sejam provocados danos pela camada drenante. Para simular o processo de instalação, e a possível danificação da geomembrana, foi efetuado laboratorialmente o ensaio de danificação mecânica sob carga repetida e, posteriormente, avaliou-se a danificação provocada pelos materiais granulares que compõe a camada drenante.

# 3

## DANIFICAÇÃO MECÂNICA DE GEOSSINTÉTICOS

### 3.1. INTRODUÇÃO

Desde a introdução dos geossintéticos em aplicações de engenharia civil, a danificação destes materiais tem sido uma das maiores preocupações. A danificação mecânica ocorre, principalmente, durante a instalação. As ações mecânicas que decorrem dos processos de instalação em obra, em muitos casos, são mais importantes do que as solicitações de serviço, uma vez que poderão ser maiores do que aquelas para as quais os materiais foram dimensionados (Koerner, 1999). As operações de manuseamento dos geossintéticos, colocação, espalhamento e compactação dos solos são os fatores que mais contribuem para a danificação mecânica, sendo a sua causa, muitas vezes, a falta de consciência dos cuidados a ter na instalação dos materiais.

Como já foi referido anteriormente, a durabilidade e o comportamento dos geossintéticos podem ser comprometidos durante a sua instalação em obra, devido a um processo construtivo inadequado. A danificação durante a instalação (DDI) tem origem nos processos construtivos e daí podem resultar danificações locais e variações das propriedades dos geossintéticos a curto prazo.

Neste capítulo serão abordados os danos provocados nos geossintéticos pelo processo de instalação, os fatores que influenciam, as consequências provenientes dessa danificação e, finalmente, os métodos de minimização.

### 3.2. DANIFICAÇÃO MECÂNICA DURANTE A INSTALAÇÃO

A DDI depende de vários fatores, entre os quais o tipo de geossintético, o tipo de solo e as condições de instalação em obra (Fig. 3.1).

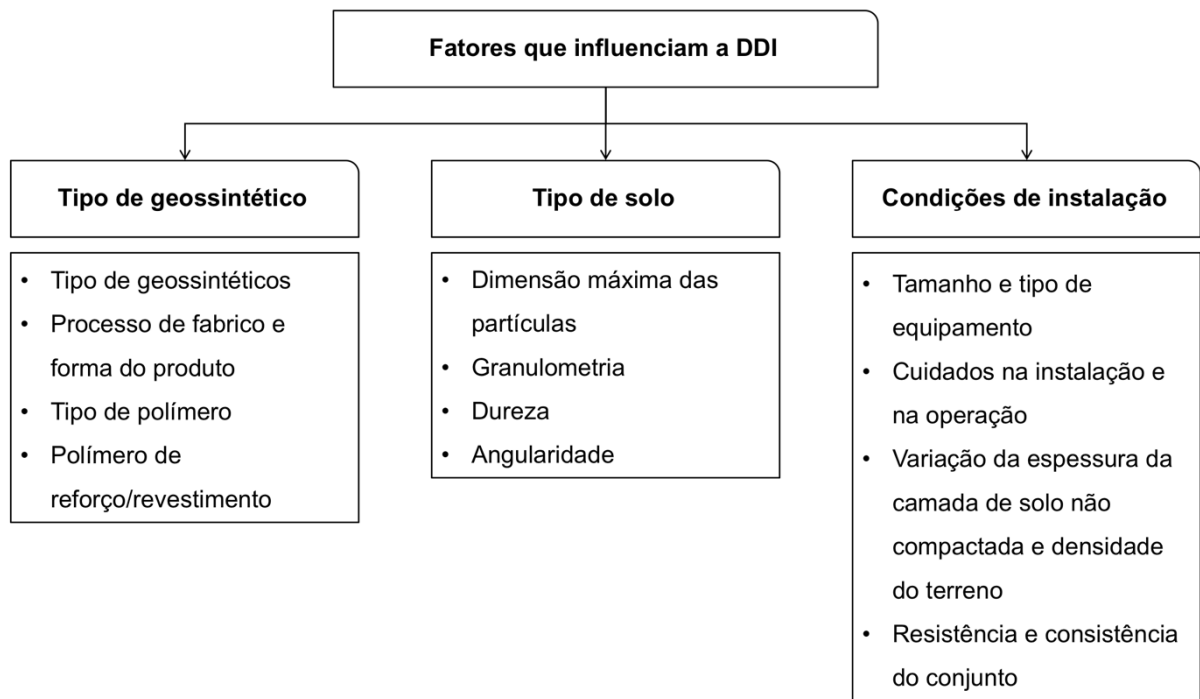


Fig. 3.1 – Fatores que influenciam a danificação durante a instalação (adaptado de Austin, 1998)

Após vários estudos realizados com diferentes tipos de geossintéticos concluiu-se que, para materiais com o mesmo processo de fabrico, quanto menor for a massa por unidade de área de um geossintético, mais significativa é a redução da resistência à DDI. (Allen e Bathrust, 1994).

O grau de danificação relacionado com o tipo de solo depende de fatores como a distribuição granulométrica do solo, a superfície das partículas de solo e a dureza das partículas de solo. Relativamente às características e à distribuição granulométrica dos solos, quanto maior a sua granulometria, maior vai ser o grau de danificação sofrido pelo geossintético. No entanto, se o solo for bem graduado, a danificação é menor do que um solo uniforme, uma vez que as partículas mais pequenas ocupam o espaço vazio entre as partículas de dimensão maior e amortecem o seu impacto (Christopher e Elias, 1998).

Os materiais de aterro de superfícies angulosas provocam uma danificação mais significativa que os de superfícies arredondadas, podendo dar origem a cortes ou aberturas nos geossintéticos. No que se refere à dureza das partículas, quanto maior a dureza, maior será a danificação induzida aos geossintéticos. Contudo, se a capacidade de fragmentação for elevada, menor é a perda de resistência (as partículas dividem-se, diminuem de dimensão e reajustam o seu espaço de contacto) (Pinho-Lopes e Lopes, 2010).

O grau de danificação durante a instalação depende de fatores como a espessura da camada de aterro, o peso do equipamento de compactação e a altura de queda do material granular. A utilização de equipamentos pesados na compactação de camadas de aterro de espessura reduzida origina uma maior perda de resistência e um grau de danificação mais gravoso. A uma maior altura de queda do solo estão associados maiores danos devido ao seu impacto com o geossintético, podendo dar origem ao aparecimento de deformações e fendas (Pinho-Lopes e Lopes, 2010).



### 3.2.1. MECANISMOS DE DANIFICAÇÃO

Os mecanismos de danificação dos geossintéticos podem ser divididos em seis tipos: abrasão, ações de punçoamento, rotura em tensão, aparecimento de fendas e separação do material, corte de fibras e rasgamento (Pinho-Lopes e Lopes, 2010).

A abrasão (Fig. 3.2 a)) é definida como o desgaste do geossintético provocado por contacto com a superfície de materiais de aterro abrasivos, quando sujeitos a ações cíclicas que implicam movimento relativo entre superfícies dos dois materiais. O mecanismo de abrasão pode desenvolver-se durante a circulação dos equipamentos de construção, o espalhamento e compactação do material de aterro sobre os geossintéticos, estando, desse modo, associadas consequências como a redução da espessura, perda de resistência e alteração nas propriedades hidráulicas dos geossintéticos.

A ação de punçoamento (Fig. 3.2 b)) ocorre quando os materiais de aterro com faces cortantes são vertidos diretamente sobre o geossintético ou quando camadas finas de material de aterro são compactadas com equipamento pesado. A ocorrência deste mecanismo é mais suscetível com materiais flexíveis sobre solos moles e reduz o desempenho, geralmente, de geotêxteis, por criar cavidades ou mesmo aberturas, impossibilitando o geossintético de exercer as funções de separação, filtragem ou proteção.

O mecanismo de rotura em tensão (Fig. 3.2 c)) pode surgir tanto durante a instalação em obra como em serviço. Durante a instalação, a circulação de equipamentos de construção pesados sobre camadas finas de material de aterro depositadas sobre o geossintético, quando colocado sobre material mole, pode levar à rotura em tensão (se o geossintético não for suficientemente flexível). No que respeita à fase de serviço, a rotura pode surgir se o geossintético for submetido a cargas e deformações excessivas. Deste modo, o mecanismo compromete o desempenho das funções de separação ou reforço para o qual o geossintético é dimensionado (Pinho-Lopes e Lopes, 2010).

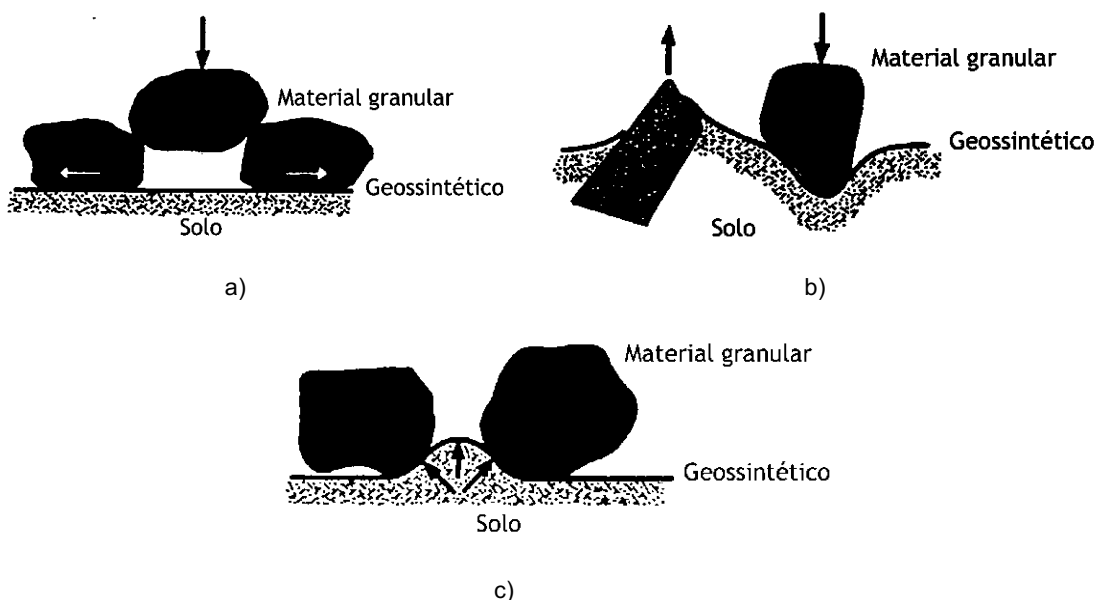


Fig. 3.2 – Mecanismo de danificação: a) Abrasão; b) Punçoamento; c) Rotura em tensão (Moreira, 2009)

O aparecimento de fendas e separação do material consiste na fragilização local do material e redução das suas propriedades mecânicas pelo contacto direto do geossintético com o material de aterro (de partículas angulosas e de faces cortantes). Este mecanismo poderá ser agravado pela circulação dos equipamentos de construção e ocorre essencialmente em geogrelhas extrudidas (Pinho-Lopes e Lopes, 2010).

À semelhança do aparecimento de fendas e separação do material, o corte de fibras ocorre quando os geossintéticos estão em contacto com agregados cujas superfícies são cortantes e este está sobre uma camada com rigidez elevada. Os materiais com menor resistência ao esforço transversal apresentam consequências mais significativas a esta danificação (Pinho-Lopes e Lopes, 2010).

O rasgamento é um mecanismo de danificação do geossintético, frequente em geotêxteis não-tecidos, que ocorre quando ações de rasgamento atuam em zonas do material onde já exista corte de fibras ou rotura em tensão. Nestes casos verifica-se a propagação dos rasgões, pelo aumento de tensão dos elementos constituintes envolventes às zonas danificadas (Pinho-Lopes e Lopes, 2010).

### 3.2.2. MODOS DE MINIMIZAR OS EFEITOS DA DDI

A fase construtiva é a fase em que se verificam as danificações dos geossintéticos mais significativas. Deste modo, é indispensável seguir alguns procedimentos cujo objetivo é minimizar os danos induzidos aos geossintéticos. A sequência construtiva representada na Fig. 3.3 é uma sugestão de uma boa prática construtiva.

Primeiramente, a superfície onde os geossintéticos vão ser colocados deve ser plana e lisa, isenta de materiais pontiagudos, detritos ou raízes. Por esse motivo, a superfície de instalação deve ser previamente tratada e preparada (Fig. 3.3 a)). O geossintético, após o tratamento da superfície, deve ser desenrolado (Fig. 3.3 b)) sem que o operador pise o material. Deve ter-se em atenção que as faixas devem sobrepor (Fig. 3.3 c)), de modo a que seja possível fazer as ligações entre troços, segundo o caderno de encargos. Seguidamente, o material confinante deve ser colocado sobre o geossintético (Fig. 3.3 d)) garantindo que não existe circulação de máquinas ou veículos até a camada atingir uma espessura de 150 mm. O material é espalhado (Fig. 3.3 e)) e, por fim, realiza-se uma compactação do mesmo (Fig. 3.3 f)), atendendo às características exigidas (Pinho-Lopes e Lopes, 2010).

Boas técnicas construtivas conduzem à redução dos riscos de danificação durante a instalação. No entanto alguns erros são cometidos devido à falta de sobreposição entre faixas, à exposição dos geossintéticos a grandes tensões induzidas durante a instalação. Os geossintéticos devem ser protegidos durante a construção, uma vez que são materiais sensíveis a diversos agentes de degradação. A ancoragem do geossintético ao solo deve ser efetuada pelas pontas e sem exercer força no geossintético ou aplicar uma pré-tensão no mesmo, facilitando a sua instalação e resultando numa melhoria do desempenho do material ao longo da vida útil. Caso seja identificado algum mecanismo de danificação, deve retirar-se a secção danificada e substituí-la, de modo a assegurar o bom desempenho futuro da obra (Shukla, 2002).

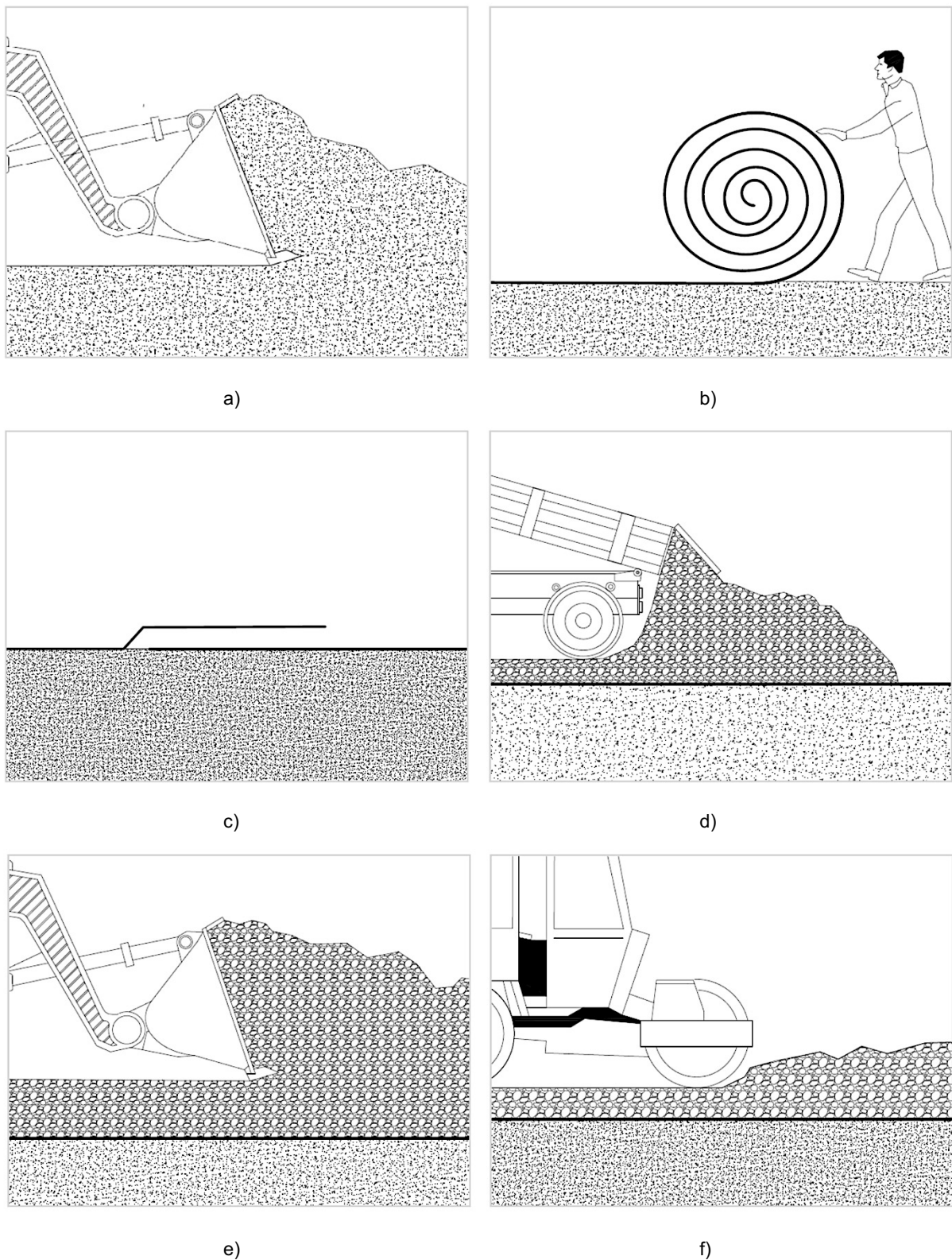


Fig. 3.3 – Procedimento construtivo a adotar na aplicação dos geossintéticos: a) Preparação da superfície; b) Colocação do geossintético; c) Sobreposição de faixas; d) Colocação do material confinante; e) Espalhamento do material confinante; f) Compactação do material confinante (Ingold e Miller, 1998)

### 3.2.3. MÉTODOS DE SIMULAÇÃO DDI

A especificação de valores mínimos para as propriedades dos geossintéticos é importante de modo a fazer um dimensionamento correto e garantir que os materiais sobrevivem às operações de instalação. A simulação da degradação resultante da instalação pode ser realizada durante a construção da obra, através de ensaios de campo (*in situ*) e ensaios laboratoriais.

#### 3.2.3.1. Ensaios de campo

Uma metodologia para avaliar os efeitos dos processos construtivos nos materiais é a avaliação *in situ* da DDI e consiste na exumação de geossintéticos instalados em obras reais. Os aterros devem ser feitos seguindo as boas práticas construtivas e a exumação das amostras deve ser cuidada para que não provoque danificação adicional às mesmas. Este método, além de dispendioso, só permite a quantificação dos efeitos da DDI em fase de obra, pelo que a sua utilização para dimensionamento dos geossintéticos não é frequente (Pinho-Lopes e Lopes, 2010).

#### 3.2.3.2. Simulação laboratorial

A realização de ensaios *in situ* e a exumação de amostras são métodos muito aproximados de situações reais de danificação dos geossintéticos durante a sua instalação. Contudo, pelo facto de ser um processo dispendioso e trabalhoso, torna a simulação laboratorial das condições de instalação um método favorável.

Segundo Bräu (1998), os ensaios de laboratório e os ensaios de campo devem ser calibrados entre eles, devido à impossibilidade de um único ensaio determinar exatamente as condições reais de instalação. Deste modo, os ensaios de simulação laboratorial devem simular a passagem de equipamentos sobre o solo em cima dos geossintéticos, permitir a existência de cargas pontuais elevadas e permitir deslocamentos relativos entre o geossintético e o solo.

De modo a haver uma uniformização a nível europeu de procedimentos laboratoriais, foi desenvolvida uma metodologia de ensaio normalizada (EN ISO 10722:2007) com o intuito de simular os efeitos da instalação dos geossintéticos em obra. Esta metodologia de ensaio é descrita no capítulo seguinte. Contudo, de maneira sucinta o procedimento consiste em colocar um provete de geossintético entre duas camadas de um agregado sintético, sendo então submetido a uma carga dinâmica, de 200 ciclos a uma frequência de 1 Hz e pressão a variar entre 5 e 500 kPa.

### 3.2.4. ALGUNS ESTUDOS DE ENSAIOS DE DANIFICAÇÃO MECÂNICA REALIZADOS ANTERIORMENTE

Paula (2003) realizou um estudo sobre os efeitos da danificação mecânica durante a instalação em sete geossintéticos, entre os quais um geotêxtil não-tecido (MUA de 800 g/m<sup>2</sup>) e uma geomembrana lisa com 1,5 mm de espessura, ensaiados individualmente. Os solos utilizados no ensaio laboratorial de danificação mecânica foram brita granítica e brita calcária. Os geossintéticos após a danificação com a brita granítica possuíam valores de resistência menores do que com a brita calcária. No entanto, a resistência retida pela geomembrana foi elevada (> 90%) e deveu-se à estrutura contínua do material (folhas contínuas de polímeros). O mesmo não aconteceu com o geotêxtil não-tecido, uma vez que a sua estrutura formada pela ligação de componentes individuais sofreu uma danificação progressiva, obtendo uma resistência inferior ( $\approx$  78%).

Lopes *et al.* (2006) avaliaram a danificação mecânica induzida em geossintéticos (entre eles, um geotêxtil tecido de polipropileno), em laboratório e *in situ*, de modo a estabelecer uma relação entre os resultados obtidos. Nos ensaios *in situ* foram realizados aterros temporários utilizando dois tipos de solos (um “*tout-venant*” e um solo residual do granito) compactados com duas energias diferentes. Os ensaios laboratoriais foram realizados com três agregados diferentes, dois naturais (granito e calcário) e um sintético (*corundum*). A caracterização destes ensaios foi realizada através de ensaios de tração. Deste estudo pode-se concluir que nos ensaios *in situ*, o solo com maior dimensão de partículas foi o mais danoso para o geotêxtil e a danificação aumentou com o aumento da energia de compactação. Assim, existiu uma grande influência do tipo de solo confinante na danificação do geotêxtil. Nos ensaios laboratoriais concluiu-se que a influência do tipo de geossintético na sua DDI foi idêntica à observada nos ensaios *in situ*.

Moreira *et al.* (2010) avaliaram o efeito da danificação mecânica de cinco geotêxteis não-tecidos (termossoldados e agulhados) com diferentes MUA. Os agregados utilizados no ensaio laboratorial de danificação mecânica foram o *corundum*, brita granítica e brita calcária. Deste estudo concluiu-se que existiram alterações significativas nas propriedades dos diferentes geotêxteis. A resistência à tração diminuiu após os ensaios de danificação mecânica com o *corundum*, e essa diminuição foi tanto maior, quando menor a MUA dos materiais. Para os geotêxteis termossoldados a diminuição foi menor do que para os geotêxteis agulhados, comparando os materiais com MUA semelhantes.

O estudo realizado por Carneiro *et al.* (2012) consistiu na avaliação da danificação mecânica durante a instalação a curto prazo, em dois geotêxteis não-tecidos com MUAs distintas. Foram realizados ensaios de danificação mecânica em laboratório, segundo a norma EN ISO 10722:2007, utilizando *corundum* (agregado normalizado) e brita granítica (agregado natural). Posteriormente, os ensaios de tração, rasgamento e punçoamento foram realizados de modo a caracterizar a danificação dos geotêxteis. Dos resultados foi possível concluir que o ensaio de danificação mecânica provocou uma diminuição das propriedades mecânicas dos materiais, sendo que os geotêxteis com maior MUA foram os mais resistentes. Relativamente aos agregados utilizados, o *corundum* provocou uma maior danificação do que a brita granítica.

Carlos *et al.* (2015) realizaram um estudo cujo objetivo foi a avaliação da danificação mecânica no comportamento de dois geotêxteis não-tecidos com MUAs diferentes, a curto prazo. Os geotêxteis foram submetidos a um procedimento normativo de danificação mecânica usando *corundum* e oito diferentes solos (entre eles a brita 14/20). A caracterização da danificação foi feita através de ensaios de tração. Os resultados obtidos mostraram reduções da resistência à tração dos geotêxteis, dependendo do tamanho das partículas, da uniformidade dos solos e da MUA dos materiais. A redução da resistência à tração provocada pelo *corundum* e pela brita 14/20 foi maior do que a induzida pelos restantes solos (Silte arenoso, areia siltosa, *tout-venant*, areia 0/2, areia 0/4, brita 4/8 e brita 6/14).

Escórcio (2016) avaliou o comportamento de dois geotêxteis não-tecidos (MUA de 200 g/m<sup>2</sup> e 400 g/m<sup>2</sup>) submetidos ao ensaio de danificação mecânica provocada por *corundum*. A caracterização da danificação mecânica foi realizada através de ensaios de tração e punçoamento estático. As principais conclusões retiradas foram que o geotêxtil com menor MUA sofreu maiores perdas de resistência à tração e ao punçoamento do que o geotêxtil com maior MUA.

O trabalho realizado por Violante (2016) consistiu na avaliação da danificação mecânica de geossintéticos, entre os quais, dois geotêxteis tecidos (com MUA de 80 g/m<sup>2</sup> e 200 g/m<sup>2</sup>) e dois geotêxteis não-tecidos (com MUA de 200 g/m<sup>2</sup> e 300 g/m<sup>2</sup>). A danificação mecânica foi induzida pelo agregado normativo *corundum* e cinco solos naturais diferentes (areia siltosa, areia 0/4, *tout-venant*, brita 4/8 e brita 6/14). Após a danificação mecânica, os geossintéticos foram caracterizados através de

ensaios de tração e de punçoamento estático. Foi possível concluir que o *corundum* foi o agregado que causou maiores perdas de resistência à tração e ao punçoamento, provando ser mais agressivo comparativamente aos solos naturais. A danificação causada pelas britas foi relativamente idêntica. Para os geotêxteis não-tecidos, as reduções de resistência à tração provocadas pelas britas foram superiores às diminuições da resistência ao punçoamento. No entanto, para os geotêxteis tecidos, as perdas de resistência à tração foram inferiores às perdas de resistência ao punçoamento.

Silva (2016) realizou um trabalho que se baseou na avaliação da danificação mecânica de geossintéticos (entre eles, geotêxteis tecidos e não-tecidos com diferentes MUAs) provocada por resíduos, entre eles um resíduo de construção e demolição (RCD) cerâmico. Os danos ocorridos no ensaio de danificação mecânica foram caracterizados por ensaios de tração e punçoamento estático. O RCD cerâmico, como resíduo de granulometria mais extensa, pode reduzir significativamente as propriedades dos geossintéticos, principalmente para os geotêxteis tecidos e não-tecido com MUA inferior. Assim, para o geotêxtil não-tecido com maior MUA ( $400 \text{ g/m}^2$ ) não se obtiveram variações muito significativas das suas propriedades mecânicas.

## 4

## PROGRAMA EXPERIMENTAL

## 4.1. INTRODUÇÃO

Os geossintéticos utilizados nesta dissertação foram submetidos ao ensaio de danificação mecânica sob carga repetida para que, posteriormente, fosse possível avaliar a perda das propriedades mecânicas dos materiais danificados comparativamente às amostras intactas. Essa avaliação realizou-se através dos ensaios de tração, de punção estático e de rasgamento (apenas para a geomembrana). A comparação, entre as amostras danificadas e as intactas, foi feita baseada nos resultados obtidos para as diferentes bases do ensaio de danificação e para os diferentes agregados, de modo que fosse possível concluir que efeitos seriam causados nos materiais.

Neste capítulo serão descritos o ensaio de danificação mecânica sob carga repetida, os ensaios usados para avaliar a danificação mecânica e os respectivos equipamentos. Para cada ensaio de caracterização serão apresentados exemplos de tratamento de dados para um ensaio tipo. Na Fig. 4.1 está representado esquematicamente o procedimento experimental usado neste trabalho.

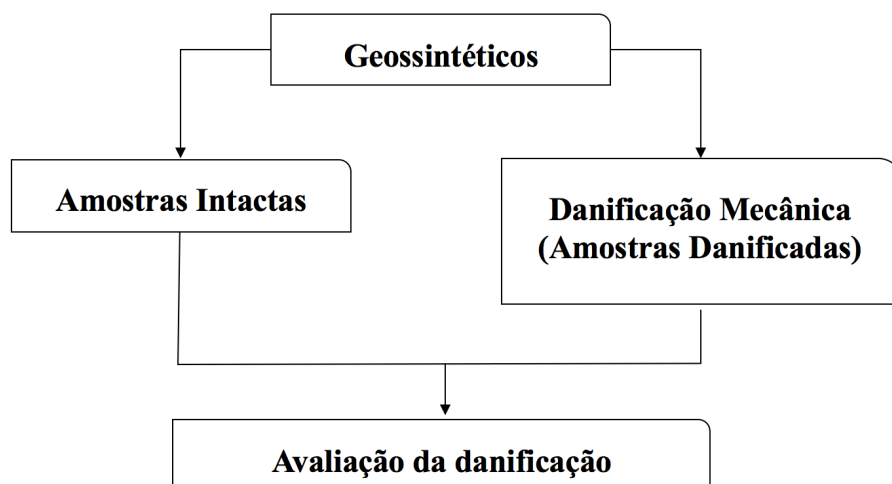


Fig. 4.1 – Diagrama do procedimento experimental

## 4.2. GEOSSINTÉTICOS

Os quatro materiais utilizados neste estudo incluíram três tipos de geossintéticos: dois geotêxteis não-tecidos de polipropileno (PP), uma geomembrana de polietileno de alta densidade (PEAD) e um geocompósito bentonítico. O geocompósito era formado por uma camada de bentonite revestida por geotêxteis de polipropileno, um tecido e um não-tecido. Foram atribuídas designações para cada tipo de material utilizado: GTX – geotêxteis não-tecidos, GMB – geomembrana e GCL – geocompósito bentonítico. A designação dos geotêxteis é seguida da massa por unidade de área do material.

As designações dadas foram:

GTX300 - Geotêxtil não-tecido de MUA 300 g.m-2 (Fig. 4.2 a))

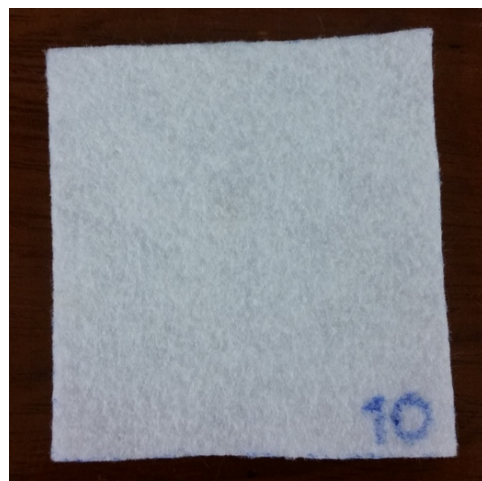
GTX400 - Geotêxtil não-tecido de MUA 400 g.m-2 (Fig. 4.2 b))

GMB - Geomembrana (Fig. 4.2 c))

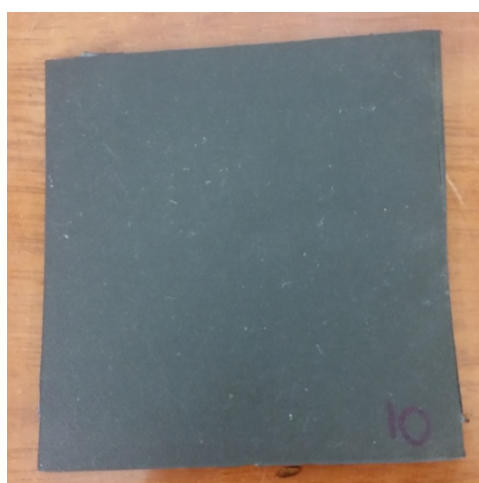
GCL - Geocompósito bentonítico (Fig. 4.2 d))



b)



b)



c)



d)

Fig. 4.2 – Geossintéticos utilizados no estudo: a) geotêxtil GTX300; b) geotêxtil GTX400; c) geomembrana; d) geocompósito bentonítico



A caracterização física dos materiais é essencial para a identificação das propriedades dos geossintéticos. Assim sendo, os materiais em estudo foram submetidos aos ensaios de determinação da massa por unidade de área e da espessura. O procedimento utilizado para os geotêxteis e para a geomembrana foi baseado nas normas NP EN ISO 9864:2006 (MUA) e NP EN ISO 9863-1:2006 (espessura). Para o geocompósito a determinação da MUA e da espessura foi realizada segundo as normas NP EN 14196:2007 e NP EN ISO 9863-1, respetivamente. Nas Tabelas 4.1 e 4.2 estão apresentados os valores médios obtidos e os referentes coeficientes de variação da MUA e da espessura, para os diferentes geossintéticos do estudo.

Tabela 4.1– Valores obtidos na determinação da espessura

Espessura	GTX300	GTX400	GMB	GCL
<b>Valor médio (mm)</b>	<b>2,65</b>	<b>2,81</b>	<b>1,96</b>	<b>8,44</b>
Coeficiente de variação [%]	6,4	3,5	1,4	5,7

Tabela 4.2 – Valores obtidos na determinação MUA

MUA	GTX300	GTX400	GMB	GCL
<b>Valor médio (g/m<sup>2</sup>)</b>	<b>312</b>	<b>411</b>	<b>1773</b>	<b>6858</b>
Coeficiente de variação [%]	8,9	4,1	1,0	2,5

### 4.3. ENSAIO DE DANIFICAÇÃO MECÂNICA SOB CARGA REPETIDA

#### 4.3.1. EQUIPAMENTO E PROCEDIMENTO

O procedimento deste ensaio tem como objetivo simular a danificação mecânica causada por agregados, quando os geossintéticos estão sujeitos a cargas repetidas. De forma a simplificar a escrita, o ensaio de danificação mecânica sob carga repetida vai tomar a designação de ensaio de danificação mecânica.

Para o ensaio de danificação mecânica foi utilizado um equipamento do Laboratório de Geossintéticos (LGS) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) (Fig. 4.3) e o procedimento experimental teve como base a norma EN ISO 10722:2007 “Geosynthetic test procedure for the evaluation of mechanical damage under repeated loading – Damage caused by granular material”. O equipamento é formado por uma caixa metálica com dimensões internas de 300 mm por 300 mm, dividida em duas partes com 75 mm de altura cada. Inclui também um mecanismo de aplicação de carga controlado para produzir ciclos de pressão compreendidos entre  $(5 \pm 0,5)$  kPa e  $(500 \pm 10)$  kPa numa placa de carregamento, com dimensões de 100 mm por 200 mm, ligada a um pistão hidráulico a uma frequência de 1 Hz.

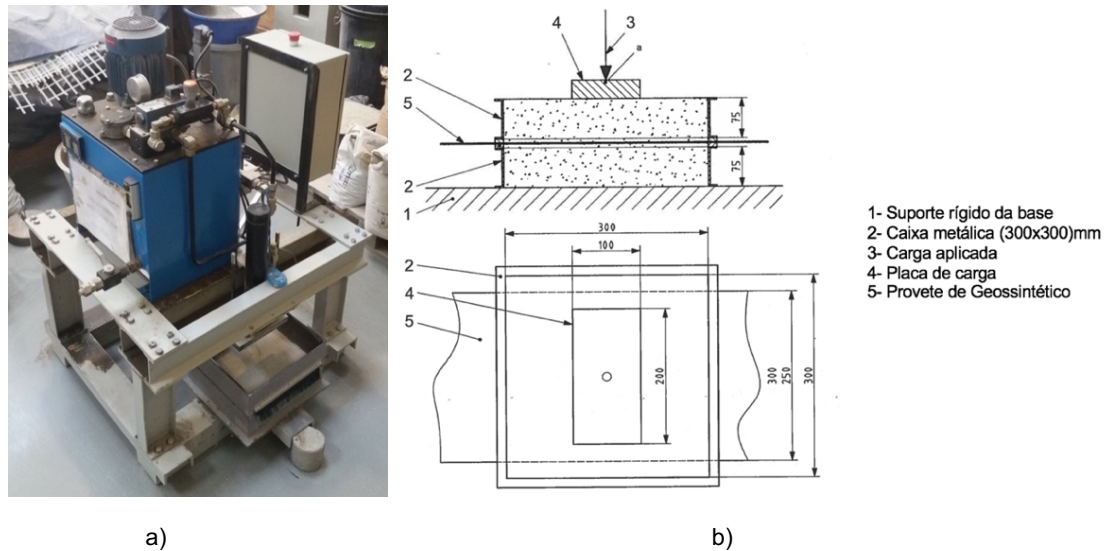


Fig. 4.3 – Equipamento do ensaio de danificação mecânica: a) Vista geral do equipamento; b) Esquema representativo da caixa de danificação (adaptado da norma EN ISO 10722:2007)

Os provetes para o ensaio de danificação mecânica foram cortados com 250 mm de largura e 500 mm de comprimento (Fig. 4.4).



Fig. 4.4 – Esquema do provete utilizado no ensaio de danificação mecânica

O preenchimento da parte inferior da caixa metálica foi realizado de dois modos diferentes: base rígida (betão) (Fig. 4.5) ou base flexível (saibro com índice de compactação de 50% e 80%). A utilização de bases flexíveis teve o objetivo de aproximar o ensaio a um exemplo real em obra, isto é, para existir uma maior semelhança às condições de implementação dos geossintéticos. O uso de diferentes bases teve em consideração as variações de granulometria e o grau de compactação do solo de aterros.

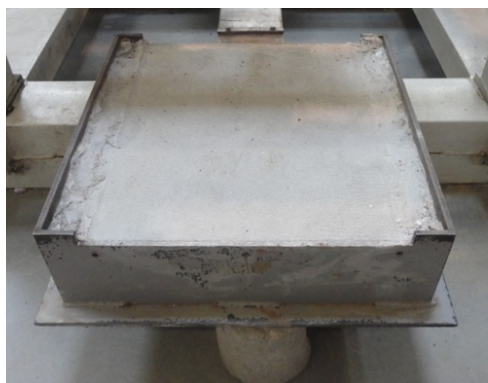


Fig. 4.5 – Base rígida

De modo a atingir o índice de compacidade (ID) do solo utilizado em cada base flexível foi calculada a quantidade de saibro relacionando com o volume da parte inferior da caixa de ensaio. Após esse cálculo, demonstrado na expressão 1.1, o saibro foi dividido em camadas.

$$ID = \frac{m}{V} [\%] \quad (1.1)$$

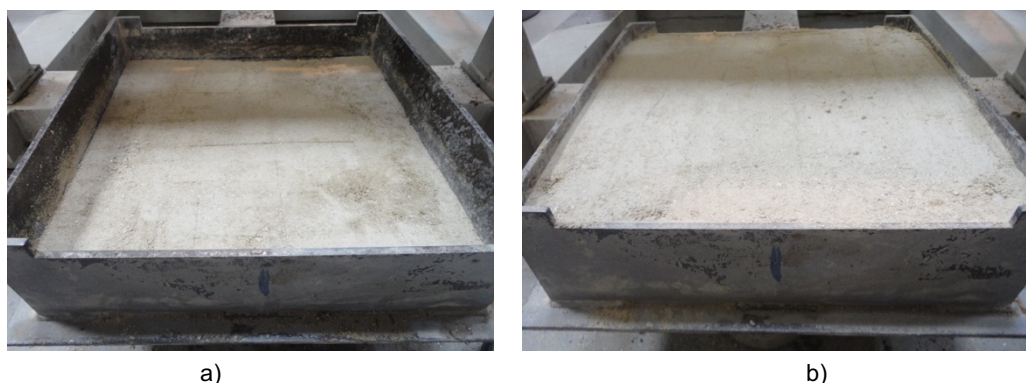
Onde,

m corresponde à quantidade de saibro utilizada para um certo nível de compacidade;

V representa o volume da parte inferior da caixa de ensaio;

Para a base flexível de saibro com índice de compacidade de 50% utilizaram-se duas camadas com 37,5 mm de altura. Por outras palavras, a quantidade de saibro a utilizar foi dividida a meio e preencheu-se a caixa com a primeira metade de solo, seguindo-se de uma compactação para o solo ocupar os 37,5 mm de altura correspondentes à 1ª camada (Fig. 4.6 a)). Repetiu-se o procedimento para a outra metade de saibro, preenchendo totalmente a parte inferior da caixa de ensaio (2ª camada compactada até perfazer os 75 mm de altura) (Fig. 4.6 b)).

Na base flexível de saibro com índice de compacidade de 80%, o solo foi dividido em quatro camadas com 18,75 mm de altura. O procedimento foi idêntico ao utilizado com o saibro com índice de compacidade de 50%, diferindo apenas na divisão da quantidade de saibro em quatro partes e no número de camadas a preencher.



a)

b)

Fig. 4.6 – Base flexível de saibro: a) Compactação da primeira subcamada de saibro com índice de compacidade de 50%; b) Preenchimento completo

Entre as duas metades da caixa foram colocados três provetes, nomeadamente, geocompósito, geomembrana e geotêxtil, visto que, num caso real, as danificações iriam ser induzidas ao sistema de impermeabilização e não a cada geossintético individualmente. A ordem de colocação dos provetes está representada nas Fig. 4.7 a), b) e c).

Os ensaios de danificação mecânica com o sistema de impermeabilização GCL + GMB + GTX400 foram realizados em todas as bases, enquanto que o sistema de impermeabilização GCL + GMB + GTX300 foi apenas ensaiado com a base rígida, para que fosse possível avaliar eventuais diferenças no comportamento dos sistemas quando usados geotêxteis com diferentes MUAs. De modo a aprofundar o estudo, foram também efetuados ensaios de danificação mecânica, usando a base rígida, com o geotêxtil não-tecido GTX300 isoladamente. Estes últimos ensaios permitiram estabelecer uma comparação do comportamento do geotêxtil GTX300 ensaiado isoladamente e do mesmo geotêxtil ensaiado com o restante sistema de impermeabilização.

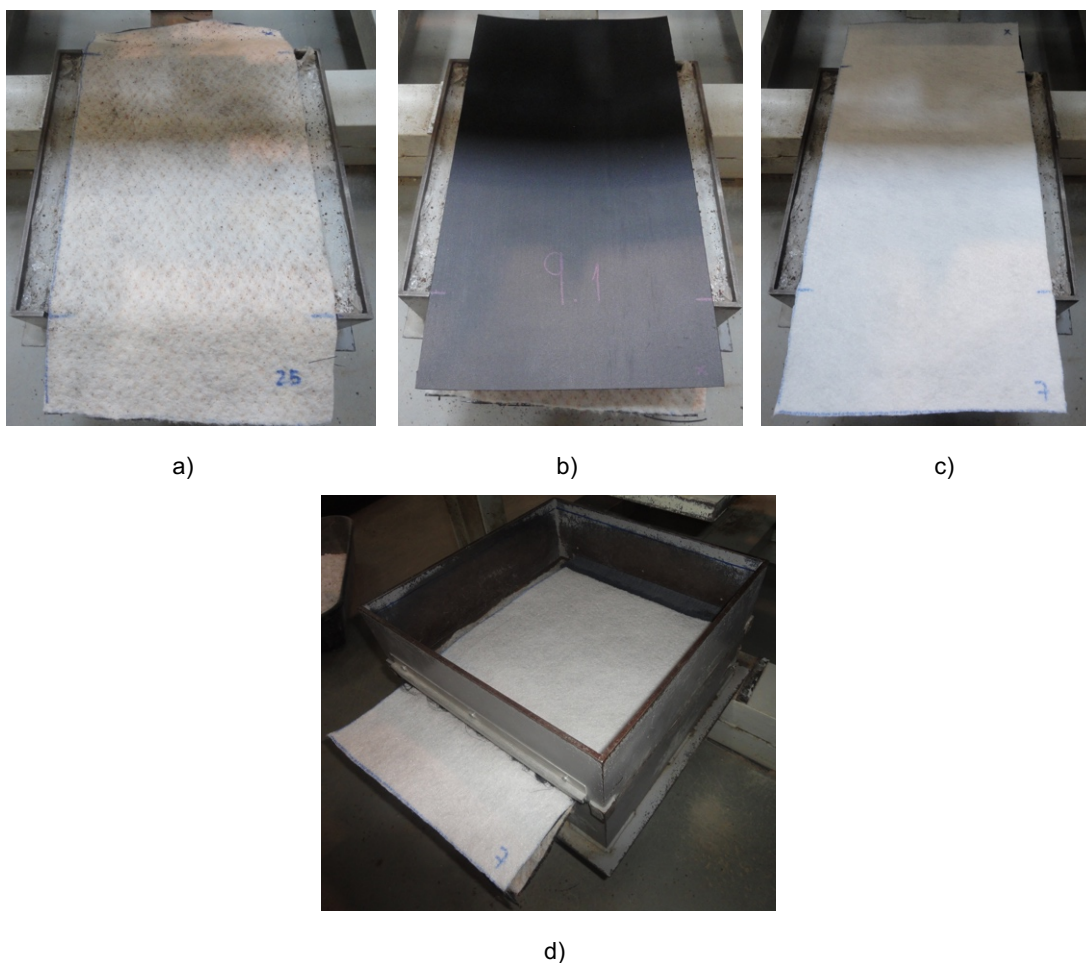


Fig. 4.7 – Colocação dos provetes: a) Provete de geocompósito; b) Provete de geomembrana; c) Provete de geotêxtil; d) Vista geral dos provetes no equipamento

Após a colocação dos provetes, foi depositada uma camada não compactada de um agregado granular (*corundum*, RCD cerâmico ou brita 14/20) com 75 mm de altura. Cada conjunto de provetes foi submetido à danificação por 200 ciclos de compressão entre  $(5 \pm 0,5)$  kPa e  $(500 \pm 10)$  kPa a uma frequência de 1 Hz (Fig. 4.8).

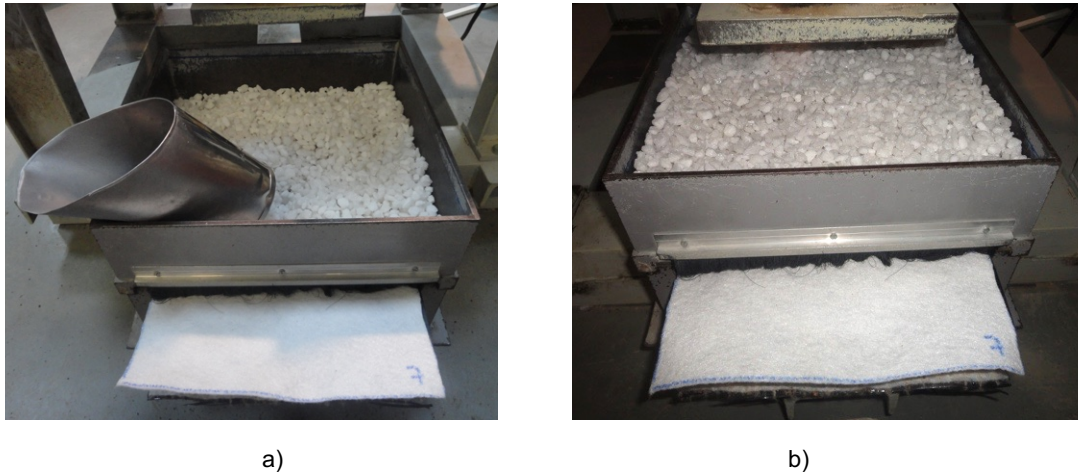


Fig. 4.8 – Ensaio de danificação mecânica: a) Enchimento da caixa superior; b) Caixa superior preenchida com agregado

#### 4.3.2. PLANO DE ENSAIOS

A Tabela 4.5 resume o plano realizado para os ensaios de danificação mecânica.

Tabela 4.3 – Plano dos ensaios realizados na dissertação

Sistema	Base	Agregado
GTX400, GMB, GCL	Rígida	<i>Corundum</i>
		RCD cerâmico
		Brita 14/20
	Flexível (Saibro ID= 50%)	<i>Corundum</i>
		RCD cerâmico
		Brita 14/20
GTX300, GMB, GCL	Rígida	<i>Corundum</i>
		RCD cerâmico
		Brita 14/20
GTX300	Rígida	<i>Corundum</i>
		RCD cerâmico
		Brita 14/20



#### 4.3.3. AGREGADOS UTILIZADOS NO ENSAIO DE DANIFICAÇÃO MECÂNICA

O ensaio de danificação mecânica foi realizado com *corundum* (Fig. 4.9 a)) (agregado sintético de óxido de alumínio especificado na norma EN ISO 10722:2007) e com mais dois agregados: um constituído por resíduos de construção e demolição (RCD cerâmico) e um de origem natural (brita 14/20) (Fig. 4.9 b) e c)). A utilização do RCD cerâmico no ensaio de danificação teve como objetivo avaliar (em termos de danificação mecânica induzida aos geossintéticos) o uso deste agregado na camada drenante, de modo a reduzir a utilização de recursos naturais. A brita é um agregado natural usado na camada drenante uma vez que a mesma ao possuir um índice de vazios elevado permite a drenagem de lixiviados e tem granulometria idêntica ao RCD cerâmico.

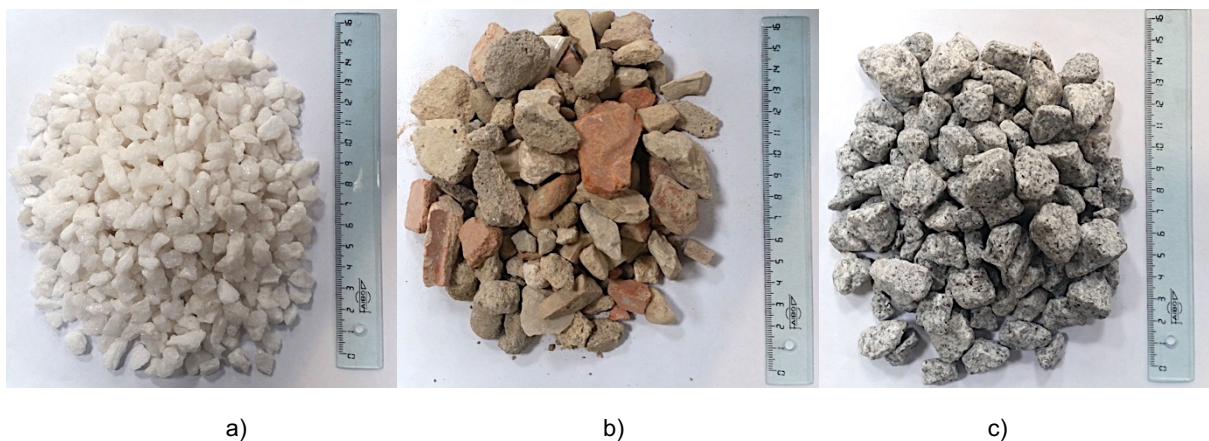


Fig. 4.9 – Agregados usados no ensaio de danificação mecânica: a) *Corundum*; b) RCD cerâmico, c) Brita 14/20

Na Fig. 4.10 podemos encontrar as curvas granulométricas dos agregados e na Tabela 4.3 os parâmetros destes três agregados.

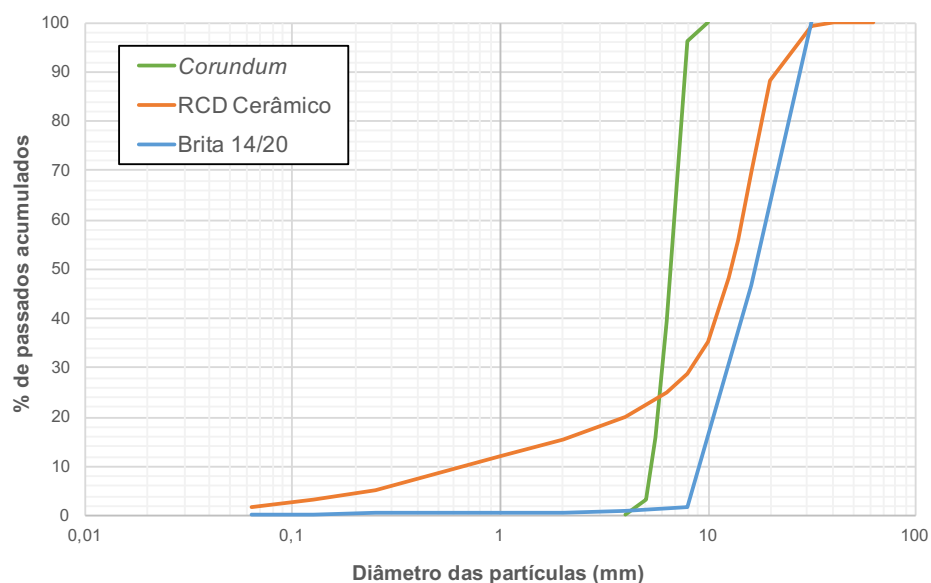


Fig. 4.10 – Curvas granulométricas dos agregados (adaptado de Carlos et al., 2015; Silva, 2016)

Estes agregados podem ser caracterizados conforme a sua textura e granulometria, sendo os principais parâmetros:

- $D_{máx}$ : dimensão máxima das partículas;
- $D_x$ : tamanho da amostra em que  $x\%$  é inferior a essa mesma dimensão;

Tabela 4.4 – Características dos agregados de danificação (adaptado de Carlos *et al.*, 2015; Silva, 2016)

Agregados	$D_{10}$ (mm)	$D_{30}$ (mm)	$D_{50}$ (mm)	$D_{60}$ (mm)	$D_{máx}$ (mm)
Corundum	5,323	6,017	6,661	6,913	10,0
RCD cerâmico	0,710	8,412	12,847	14,615	20,0
Brita 14/20	9,447	13,014	16,948	19,859	31,5

#### 4.3.4. SOLO UTILIZADO NA BASE FLEXÍVEL DO ENSAIO DE DANIFICAÇÃO MECÂNICA

Para a base flexível do ensaio de danificação mecânica foi utilizado um solo residual de granito, designado neste trabalho como saibro (Fig. 4.11). A caracterização física envolve a determinação da densidade de partículas sólidas, os valores do peso volúmico (mínimo e máximo) e a análise granulométrica de acordo com as normas ASTM D4253-93 e ASTM D4254-93, entre outras presentes na Tabela 4.4. Este solo pode ser classificado como SW-SM (areia bem graduada com silte e cascalho) devido à sua granulometria extensa (Fig. 4.12) (Ferreira, 2015).



Fig. 4.11 – Solo usado na base flexível do ensaio de danificação mecânica: Saibro

As designações da Tabela 4.4 têm os seguintes significados:

- $D_x$ : tamanho da amostra em que  $x\%$  é inferior a essa mesma dimensão;
- $C_u$ : Coeficiente de uniformidade, grau de uniformidade do solo.
  - Solo uniforme -  $C_u < 5$ ;
  - Solo medianamente uniforme -  $5 < C_u < 15$ ;
  - Solo não uniforme -  $C_u > 15$ ;
- $C_c$ : Coeficiente de curvatura, informação sobre a graduação do solo.
  - $1 < C_c < 3$  corresponde a solos bem graduados;

- $\gamma_{dmax}$ : Peso volúmico seco máximo;
- $\gamma_{dmin}$ : Peso volúmico seco mínimo;
- $e_{min}$ : Índice de vazios mínimo;
- $e_{max}$ : Índice de vazios máximo;
- $w_{ótimo}$ : Teor de água ótimo;
- $w_L$ : Limite de liquidez;

Tabela 4.5– Características do solo utilizado na base flexível do ensaio de danificação (adaptado de Ferreira, 2015)

Índice Físico	Saibro
$D_{10}$ (mm)	0,09
$D_{30}$ (mm)	0,35
$D_{50}$ (mm)	1,00
$C_U$	16,9
$C_C$	1,0
$\gamma_{dmax}$ (kN/m <sup>3</sup> )	18,14
$\gamma_{dmin}$ (kN/m <sup>3</sup> )	13,40
$e_{min}$	0,476
$e_{max}$	0,998
$w_{ótimo}$ (%)	11,45
$w_L$ (%)	43

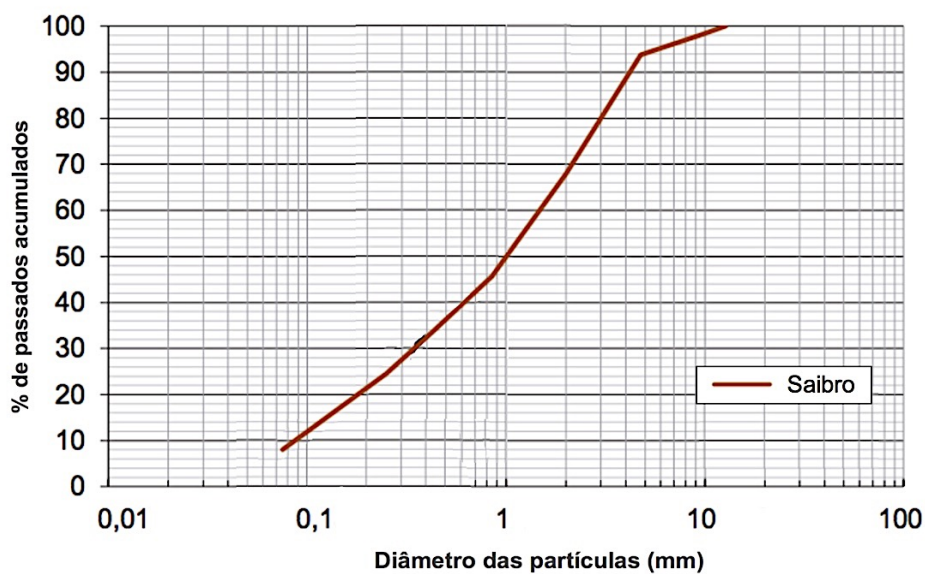


Fig. 4.12 – Curva granulométrica do solo utilizado na base flexível do ensaio de danificação mecânica (adaptado de Ferreira, 2015)



#### 4.4. CARACTERIZAÇÃO DA DANIFICAÇÃO MECÂNICA

Segundo a norma EN ISO 10722:2007, os provetes danificados para além de serem avaliados visualmente, devem estar sujeitos a ensaios de referência para que se identifique a alteração das suas propriedades mecânicas. A inspeção visual consiste em avaliar a olho nu os danos provocados pela danificação dos provetes, entre eles a existência de danos pontuais (cortes, rasgos ou furos).

O principal ensaio de referência para caracterização da danificação é o ensaio de tração em tiras largas, obrigatório para os geotêxteis e geocompósito, especificado na norma NP EN ISO 10319: 2005. No entanto, existem ensaios hidráulicos e/ou mecânicos, de carácter facultativo, tendo-se realizado para todos os materiais os ensaios de punçoamento estático (NP EN ISO 12236:2008) e, apenas para a geomembrana, o ensaio de rasgamento (ASTM D1004-09) e de tração (ASTM D638-10).

Na tabela seguinte estão resumidos os ensaios de avaliação da danificação mecânica para cada geossintético utilizado assim como a respetiva norma.

Tabela 4.6 – Ensaio de avaliação da danificação

Ensaio	GTx	GMB	GCL
Ensaio de tração (NP EN ISO 10319, 2005)	✓		✓
Ensaio de tração (ASTM D638-10)		✓	
Ensaio de Punçoamento (NP EN ISO 12236,2008)	✓	✓	✓
Ensaio de Rasgamento (ASTM D1004-09)		✓	

##### 4.4.1. ENSAIO DE TRAÇÃO EM TIRAS LARGAS: NP EN ISO 10319: 2005

O ensaio de tração tem como objetivo a determinação das características e propriedades à tração de alguns geossintéticos, usando tiras largas. Nestes geossintéticos estão incluídos geotêxteis, geocompósitos e geogrelhas. Contudo, nas geogrelhas pode haver a necessidade de alterar as dimensões dos provetes.

Neste estudo avaliou-se o comportamento à tração de provetes de geotêxtil e geocompósito que foram danificados através do ensaio de danificação mecânica e, posteriormente, comparou-se com provetes não danificados.

##### 4.4.1.1. Procedimento

Os ensaios de tração foram realizados num equipamento da marca Lloyd Instruments, modelo LR 10 K Plus com garras de compressão hidráulica. O ensaio decorreu a uma velocidade de 20 mm/min. Os geossintéticos foram ensaiados, na direção de fabrico, com provetes de dimensão de 300 mm de comprimento e 200 mm de largura (Fig. 4.13). A área útil do provete tem 100 de comprimento e 200 mm de largura, ficando o restante posicionado no interior das garras de compressão hidráulica.

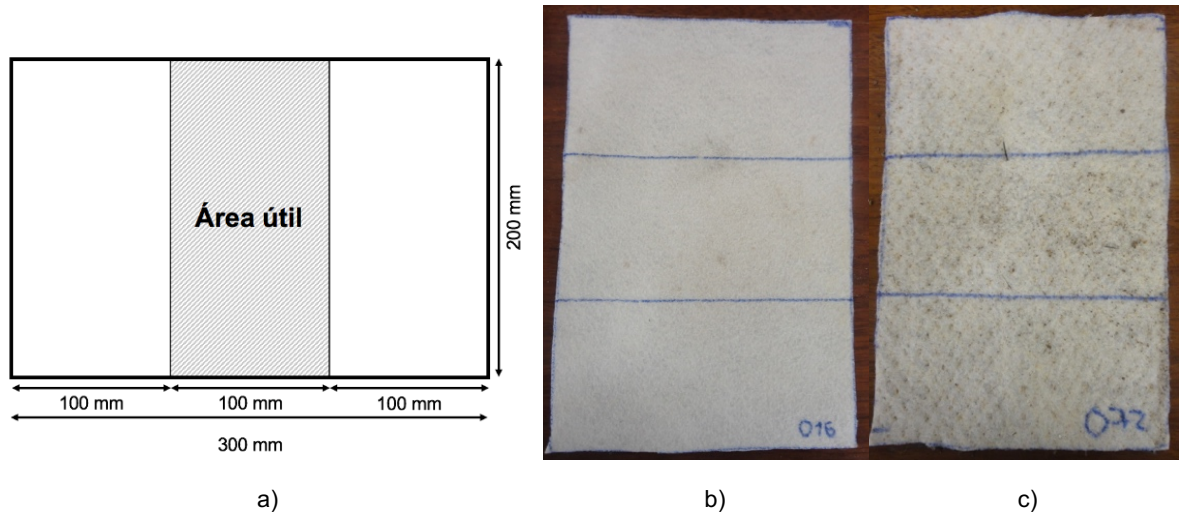


Fig. 4.13 – Provetes do ensaio de tração: a) Esquema do provete; b) Provete de GTX400; c) Provete de GCL

As garras de compressão hidráulica foram selecionadas com o objetivo de evitar o escorregamento dos provetes e a extensão foi medida através do deslocamento relativo entre elas. A Fig. 4.14 ilustra um exemplo de um ensaio de tração.

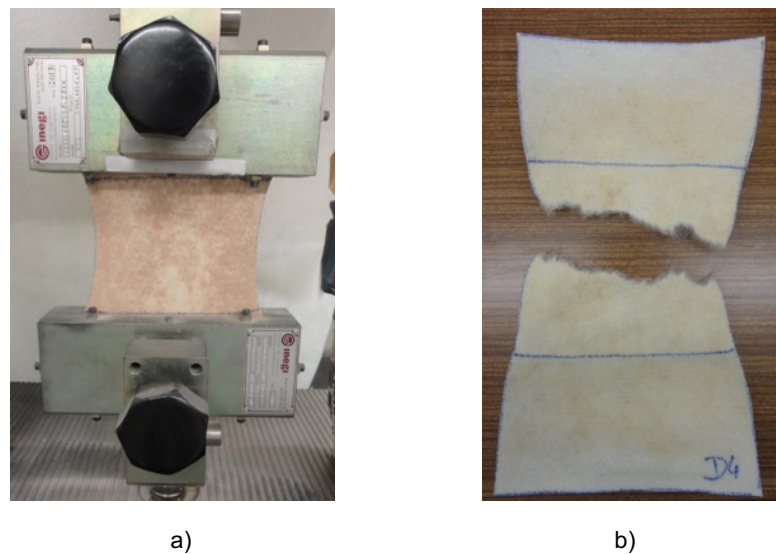


Fig. 4.14 – Ensaio de tração-extensão: a) Início do ensaio; b) Provete após o ensaio

#### 4.4.1.2. Tratamento de dados

Para cada provete foram obtidas algumas propriedades à tração dos materiais, entre elas os valores da força (em N) e do deslocamento relativo entre garras (em mm). Estes valores permitiram calcular a força por unidade de largura ( $T$ , em kN/m) e a extensão ( $\epsilon$ , em %), como podemos ver nas expressões 1.2 e 1.3.

$$T = \frac{F}{1000} * \frac{1}{B} \text{ [kN/m]} \quad (1.2)$$

Onde,

F corresponde à força registrada em N;

B representa a largura nominal dos provetes, em metros. Neste caso, B=0,2 m;

$$\varepsilon = \frac{d}{di} * 100 \text{ [%]} \quad (1.3)$$

Onde,

d corresponde ao deslocamento para uma determinada força;

di representa a distância entre garras inicial;

Com os valores obtidos de cada provete calcularam-se os valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação da força por unidade de largura máxima (resistência à tração) e da extensão na força máxima ( $\varepsilon_{FM}$ ). Como o tratamento de dados para os geotêxteis foi semelhante ao do geocompósito, na Tabela 4.7 está um exemplo de tratamento com os resultados obtidos num ensaio de tração de uma amostra intacta do geotêxtil GTX400.

Tabela 4.7 – Resultados obtidos no ensaio de tração do geotêxtil GTX400 (amostra de referência)

Proвете	Força [N]	T [kN/m]	$\varepsilon_{FM}$ [%]
1	6791	33,96	85,4
2	5515	27,57	79,7
3	5605	28,03	86,7
4	5795	28,98	84,9
5	5787	28,94	76,8
<b>Valor Médio</b>	<b>5899</b>	<b>29,49</b>	<b>82,7</b>
Desvio Padrão	513	2,57	4,2
Coeficiente de Variação [%]	8,7	8,7	5,1

As curvas dos cinco provetes intactos do geotêxtil GTX400 estão representadas na figura seguinte, assim como a curva média dos provetes criada a partir da equação das linhas de tendência polinomiais dos mesmos.

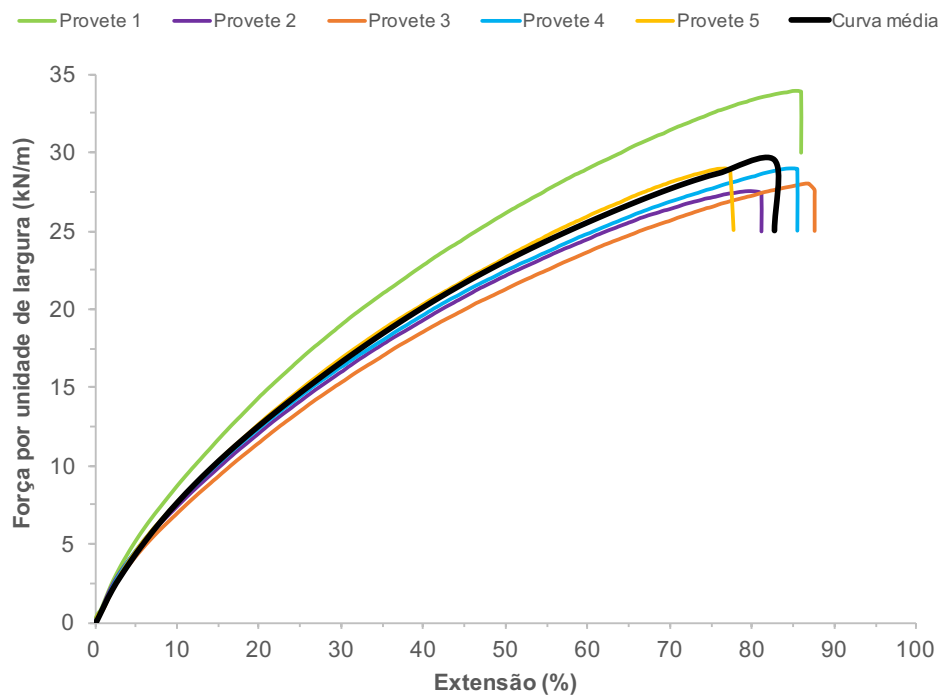


Fig. 4.15 – Curvas força por unidade de largura - extensão dos cinco provetes de geotêxtil GTX400 e respetiva curva média

A variação da resistência à tração pode ser avaliada através da resistência à tração residual (RTR, em %), que representa a resistência que o material danificado tem, em comparação à que tinha antes da danificação. A expressão 1.4 foi utilizada para o cálculo da RTR.

$$RTR = \frac{T_{danificado}}{T_{intacto}} * 100 [\%] \quad (1.4)$$

Onde,

$T_{danificado}$  é o valor médio da resistência à tração dos provetes danificados;

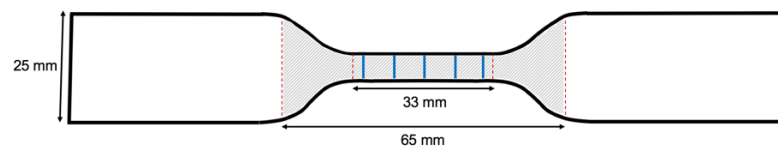
$T_{intacto}$  corresponde ao valor médio da resistência à tração dos provetes intactos;

#### 4.4.2. ENSAIO DE TRAÇÃO: ASTM D638-10

Este ensaio de tração foi realizado segundo a norma ASTM D638-10, de modo a determinar as propriedades à tração da geomembrana, na sua direção de fabrico. Uma particularidade do ensaio é o facto do mesmo só pode ser realizado quando o material tem uma espessura até 14 mm.

##### 4.4.2.1. Procedimento

Antes dos provetes serem ensaiados à tração, foi necessário fazer medições da espessura e largura em cinco pontos da parte central de cada provete, representado a azul na Fig. 4.16 a), com recurso a uma craveira eletrónica (precisão de 0,01 mm) (Fig. 4.16).



a)



b)



c)

Fig. 4.16 – a) Esquema do provete utilizado; b) Provete de GMB; c) Craveira eletrônica

Este ensaio de tração foi realizado no mesmo equipamento do ensaio de tração em tiras largas. Os provetes foram fixados na posição vertical nas garras hidráulicas, com uma distância inicial entre garras de 65 mm. Iniciou-se o ensaio a uma velocidade constante de 50 mm/min, registrando-se as propriedades da geomembrana à tração. Na Fig. 4.17, podemos ver as diferentes fases do ensaio.



a)



b)



c)

Fig. 4.17 – Ensaio de tração da GMB: a) Início do ensaio; b) Provete durante o ensaio; c) Rotura do provete

#### 4.4.2.2. Tratamento de dados

As propriedades obtidas no ensaio de tração foram os valores da força (em N), entre elas a força de cedência e de rotura para cada provete, e os respetivos deslocamentos (em mm). Com as medições da espessura e largura (em mm), calculou-se a área da secção média (em m<sup>2</sup>) de cada provete, através da expressão 1.5. As medições de espessura e largura foram necessárias para a determinação da secção média de cada provete que, posteriormente será necessária para o cálculo da tensão dos mesmos.

$$A = \frac{\sum_i^5 l_i * e_i}{5} * 10^{-6} \text{ [m}^2\text{]} \quad (1.5)$$

Onde,

$l_i$  representa a largura de cada provete, em mm;

$e_i$  é a espessura de cada provete, em mm;

Na Tabela 4.8 estão apresentados os valores da largura e espessura, assim como os valores da área de secção média de um provete intacto da geomembrana.

Tabela 4.8 – Determinação da área de secção média

Ponto de medição	Espessura (mm)	Largura (mm)	Área da secção 10 <sup>5</sup> (m <sup>2</sup> )
1	1,93	5,79	1,12
2	1,90	5,82	1,11
3	1,90	5,81	1,10
4	1,94	5,84	1,13
5	1,94	5,81	1,13
<b>Área de secção média</b>			<b>1,12</b>

Estes valores, juntamente com os obtidos no ensaio de tração, permitiram calcular o valor da tensão ( $T$ , em MPa) e da deformação ( $\varepsilon$ , em %), tanto na cedência ( $T_{CED}$  e  $\varepsilon_{CED}$ ) como na rotura ( $T_{ROT}$  e  $\varepsilon_{ROT}$ ), representados nas expressões 1.6 e 1.7.

$$T = \frac{F}{A} * 10^{-6} \text{ [MPa]} \quad (1.6)$$

Onde,

$F$  corresponde à força registada em N ( $F_{CED}$  e  $F_{ROT}$ );

$A$  é a área da secção média em m<sup>2</sup>, calculado em 1.4;

$$\varepsilon = \frac{d}{d_i} * 100 \text{ [%]} \quad (1.7)$$

Onde,

$d$  corresponde ao deslocamento para uma determinada força;

$d_i$  representa a distância de referência (distância inicial da zona onde existe deformação do provete),  $d_i = 33$  mm;

Um exemplo do tratamento de dados para a determinação da tensão de cedência em 5 provetes da geomembrana está apresentado na Tabela 4.9. A determinação tensão da rotura foi calculada de modo idêntico.

Tabela 4.9 – Determinação da tensão de cedência (amostras de referência)

Proвете	Área secção média $10^5$ (m <sup>2</sup> )	$F_{\text{máx.CED}}$ (N)	$T_{\text{CED}}$ (MPa)
1	1,12	212	19,0
2	1,11	222	19,9
3	1,11	228	20,6
4	1,09	222	20,4
5	1,11	225	20,2
<b>Valor Médio</b>		<b>222</b>	<b>20,0</b>
Desvio Padrão		6	0,6
Coeficiente de Variação [%]		2,7	3,2

Com os valores da tensão de cedência, tensão de rotura e a deformação obtidos de cada provete calcularam-se os valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação. Na tabela seguinte está representado um exemplo de tratamento com os resultados obtidos num ensaio de tração de uma amostra intacta da geomembrana.

Tabela 4.10 – Resultados obtidos no ensaio de tração da GMB em cedência e rotura (amostra de referência)

Proвете	$T_{\text{CED}}$ [MPa]	$\epsilon_{\text{CED}}$ [%]	$T_{\text{ROT}}$ [MPa]	$\epsilon_{\text{ROT}}$ [%]
1	19,0	19,1	21,5	712,9
2	19,9	21,4	18,4	611,9
3	20,6	21,9	17,7	573,2
4	20,4	19,4	19,8	628,1
5	20,2	20,8	18,1	609,1
<b>Valor Médio</b>	<b>20,0</b>	<b>20,5</b>	<b>19,1</b>	<b>627,0</b>
Desvio Padrão	0,6	1,2	1,5	52,0
Coeficiente de Variação [%]	3,2	5,9	8,0	8,3

Na Fig. 4.18 estão representadas as curvas obtidas no ensaio de tração para os cinco provetes intactos da geomembrana.

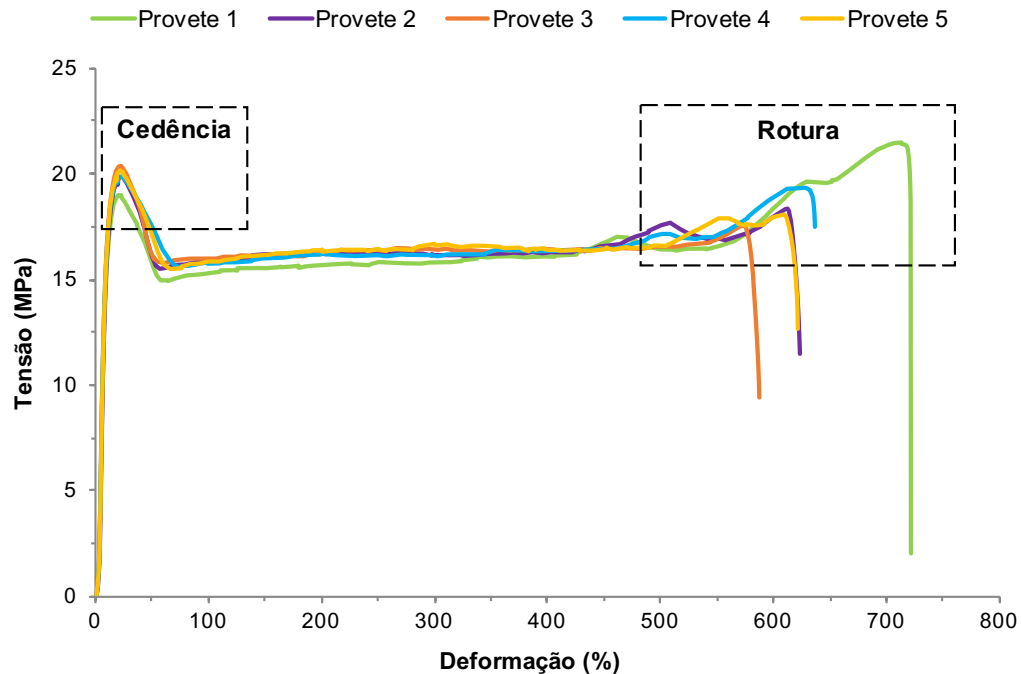


Fig. 4.18 – Curvas tensão-deformação dos cinco provetes de geomembrana

#### 4.4.3. ENSAIO DE PUNÇOAMENTO ESTÁTICO

Este ensaio tem por base a norma NP EN ISO 12236:2008, cujo objetivo é medir a força necessária para pressionar um pilão de extremidade plana através dos geossintéticos. O ensaio pode ser aplicado à maior parte dos materiais, à exceção daqueles com aberturas maiores que 10 mm. Todos os geossintéticos utilizados neste estudo foram ensaiados segundo esta norma.

##### 4.4.3.1. Procedimento

Em semelhança com o ensaio de tração, o ensaio de punçoamento estático decorreu na máquina Lloyd Instruments, modelo LR 10K Plus. Foram cortados cinco provetes de cada material, correspondendo à área útil de ensaio um círculo de diâmetro 150 mm (Fig. 4.19 a)). Posteriormente, procedeu-se à fixação de um provete entre dois anéis de aço com diâmetro interno igual a  $(150 \pm 0,5)$  mm, representado na Fig. 4.19 b)).



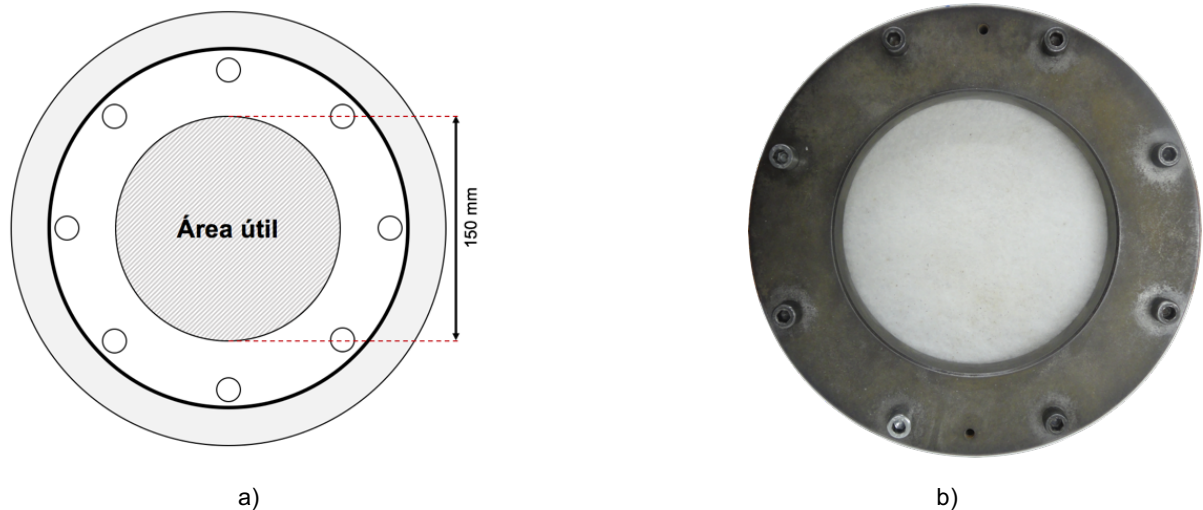


Fig. 4.19 – Provetes do ensaio de punção estático: a) Esquema do provete utilizado; b) Montagem do provete de GTX400 entre os anéis de aço

Após a montagem, um pilão com  $(50 \pm 0,5)$  mm de diâmetro foi deslocado perpendicularmente ao provete até entrar em contacto com este (Fig. 4.20 a)), mas sem exercer pressão sobre o mesmo. De seguida iniciou-se o ensaio a uma velocidade constante de 50 mm/min no qual o pilão foi avançando até à rotura do provete, ilustrado na (Fig. 4.20 b)), registando-se os valores da força de punção e respetivo deslocamento.



Fig. 4.20 – Ensaio de punção estático: a) Início do ensaio com o pilão encostado ao provete;  
b) Deformação do provete durante o ensaio

#### 4.4.3.2. Tratamento de dados

Para cada provete foram obtidos os valores da força (em N) e a distância percorrida pelo pilão após o contacto com o material (em mm). Na Tabela 4.11, como exemplo de tratamento de dados, encontram-se os valores obtidos durante o ensaio dos provetes intactos do geotêxtil GTX400, onde estão

representados a forma máxima de punçãoamento ( $F_p$ , em N) e o deslocamento para essa mesma força ( $h_p$ , em mm). As curvas força-deslocamento dos provetes intactos do GTX400 estão ilustradas na Fig. 4.21.

Tabela 4.11 – Resultados obtidos no ensaio de punçãoamento estático do geotêxtil GTX400 (amostra de referência)

Proвете	$F_p$ [N]	$h_p$ [mm]
1	5220	55,3
2	5608	56,0
3	5472	54,2
4	5334	54,7
5	5303	55,3
<b>Valor Médio</b>	<b>5388</b>	<b>55,1</b>
Desvio Padrão	153	0,7
Coeficiente de Variação [%]	2,8	1,2

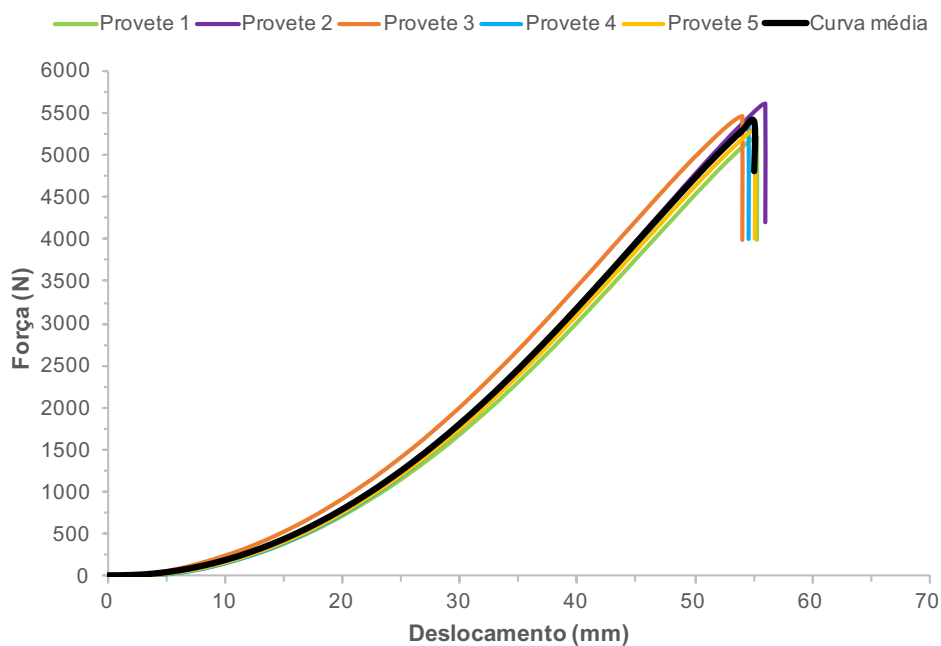


Fig. 4.21 – Curvas força-deslocamento dos cinco provetes intactos de geotêxtil GTX400

A variação da resistência ao punçãoamento pode ser avaliada através da resistência ao punçãoamento residual (RPR, em %), que representa a perda (ou não) de resistência provocada pelos ensaios de degradação mecânica quando comparado com as amostras intactas. Recorreu-se à expressão 1.8 para o cálculo da RPR.

$$RPR = \frac{F_{Pdanificado}}{F_{Pintacto}} * 100 [\%] \quad (1.8)$$

Onde,

$F_{Pdanificado}$  é o valor médio da resistência ao punçoamento dos provetes danificados;

$F_{Pintacto}$  corresponde ao valor médio da resistência ao punçoamento dos provetes intactos;

#### 4.4.4. ENSAIO DE RASGAMENTO

O ensaio de rasgamento foi aplicado à geomembrana e foi realizado segundo a norma ASTM D1004-09, tendo sido determinada a força de rasgamento dos provetes.

##### 4.4.4.1. Procedimento

O ensaio de rasgamento foi realizado no mesmo equipamento que os ensaio de tração e de punçoamento estático, recorrendo também às garras de compressão hidráulicas. Os provetes, (Fig. 4.22), foram colocados perpendicularmente às garras com uma distância, entre elas, de 101,6 mm (provetes ensaiados na direção de fabrico).

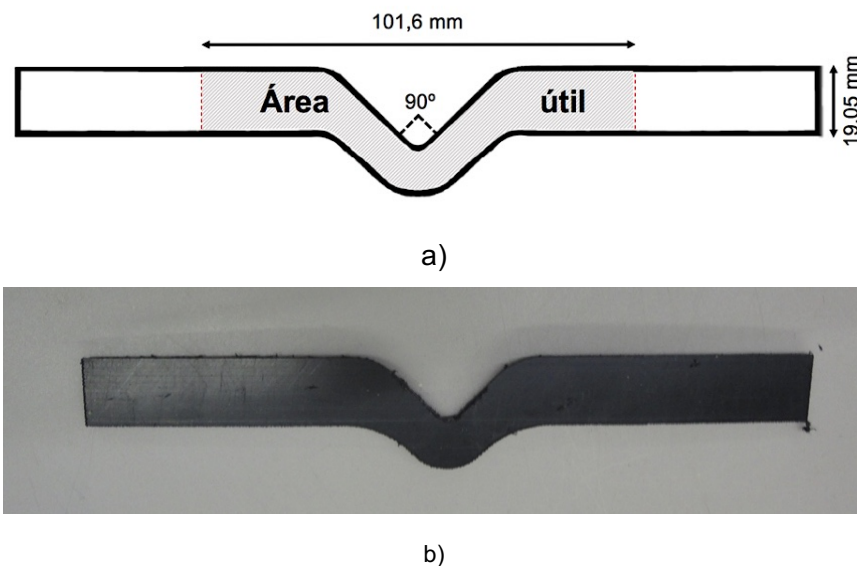


Fig. 4.22 – Provetes do ensaio de rasgamento: a) Esquema do provete utilizado; b) Provete de geomembrana

Iniciou-se o ensaio a uma velocidade constante de 51 mm/min até à rotura do provete, como podemos ver nas Fig. 4.23, e registou-se a força máxima atingida.

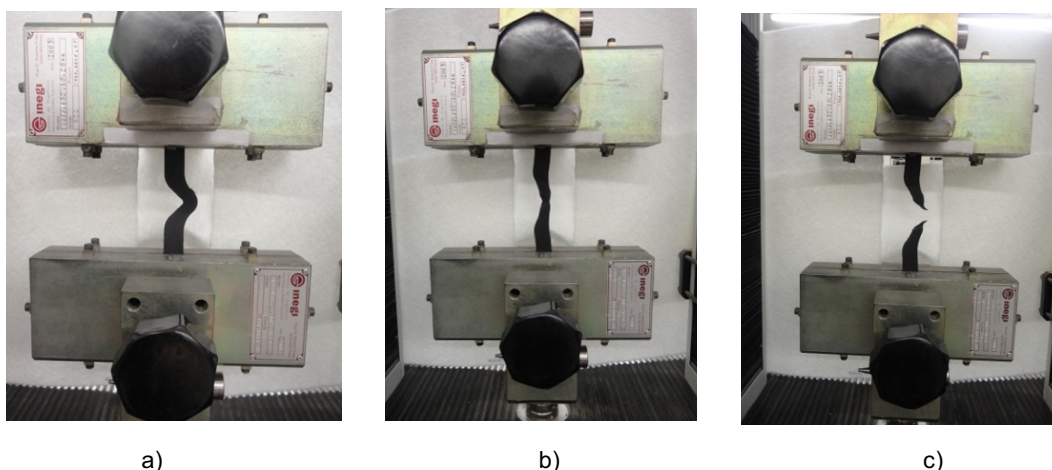


Fig. 4.23 – Ensaio de rasgamento: a) Início do ensaio; b) Durante o ensaio; c) Rotura do provete

#### 4.4.4.2. Tratamento de dados

Como foi referido anteriormente, no ensaio de rasgamento foi possível determinar os valores da força de rasgamento (em N). Como exemplo de tratamento de dados, na Tabela 4.12 encontram-se os valores obtidos durante o ensaio dos provetes intactos da geomembrana, onde estão representados os valores da forma máxima atingida ( $F_R$ , em N).

Tabela 4.12 – Resultados obtidos no ensaio de rasgamento da geomembrana (amostra de referência)

Proвете	$F_R$ [N]
1	341
2	342
3	351
4	353
5	339
<b>Valor Médio</b>	<b>345</b>
Desvio Padrão	6
Coefficiente de Variação [%]	1,8

A variação da resistência ao rasgamento pode ser avaliada através da resistência ao rasgamento residual (RRR, em %), recorrendo-se à expressão 1.9 para o seu cálculo.

$$RRR = \frac{F_{R\text{danificado}}}{F_{R\text{intacto}}} * 100 \text{ [%]} \quad (1.9)$$

Onde,

$F_{R\text{danificado}}$  é o valor médio da resistência ao rasgamento dos provetes danificados;

$F_{R\text{intacto}}$  corresponde ao valor médio da resistência ao rasgamento dos provetes intactos;

# 5

## RESULTADOS EXPERIMENTAIS

### 5.1. INTRODUÇÃO

No capítulo anterior foram referidos os geossintéticos e foram descritos os procedimentos dos ensaios de danificação mecânica, assim como os ensaios de avaliação da danificação ocorrida.

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos na avaliação da danificação dos geossintéticos, primeiramente a inspeção visual e posteriormente os resultados dos ensaios de tração, punção estático e rasgamento.

O principal objetivo é a comparação dos diferentes resultados dependendo dos geossintéticos, bases e materiais de danificação utilizados. Os resultados dos ensaios serão apresentados sob a forma de valores médios e coeficientes de variação, tanto para amostras intactas como para amostras danificadas.

### 5.2. GEOTÊXTIL NÃO-TECIDO GTX400

#### 5.2.1. INSPEÇÃO VISUAL

Os ensaios de danificação mecânica aparentemente não provocaram danos significativos no geotêxtil não-tecido GTX400. O *corundum* (Fig. 5.1 b) e o RCD cerâmico (Fig. 5.1 c) provocaram alguns punçamentos pontuais no material, devido à angulosidade dos agregados. A brita 14/20 (Fig. 5.1 d) não provocou danos visíveis no geotêxtil.

Devido à fragmentação dos agregados em partículas menores, o geotêxtil acabou por acumular alguma sujidade, sendo mais visível nos ensaios com RCD cerâmico. O comportamento do geotêxtil GTX400 foi idêntico nas diversas bases de ensaio.

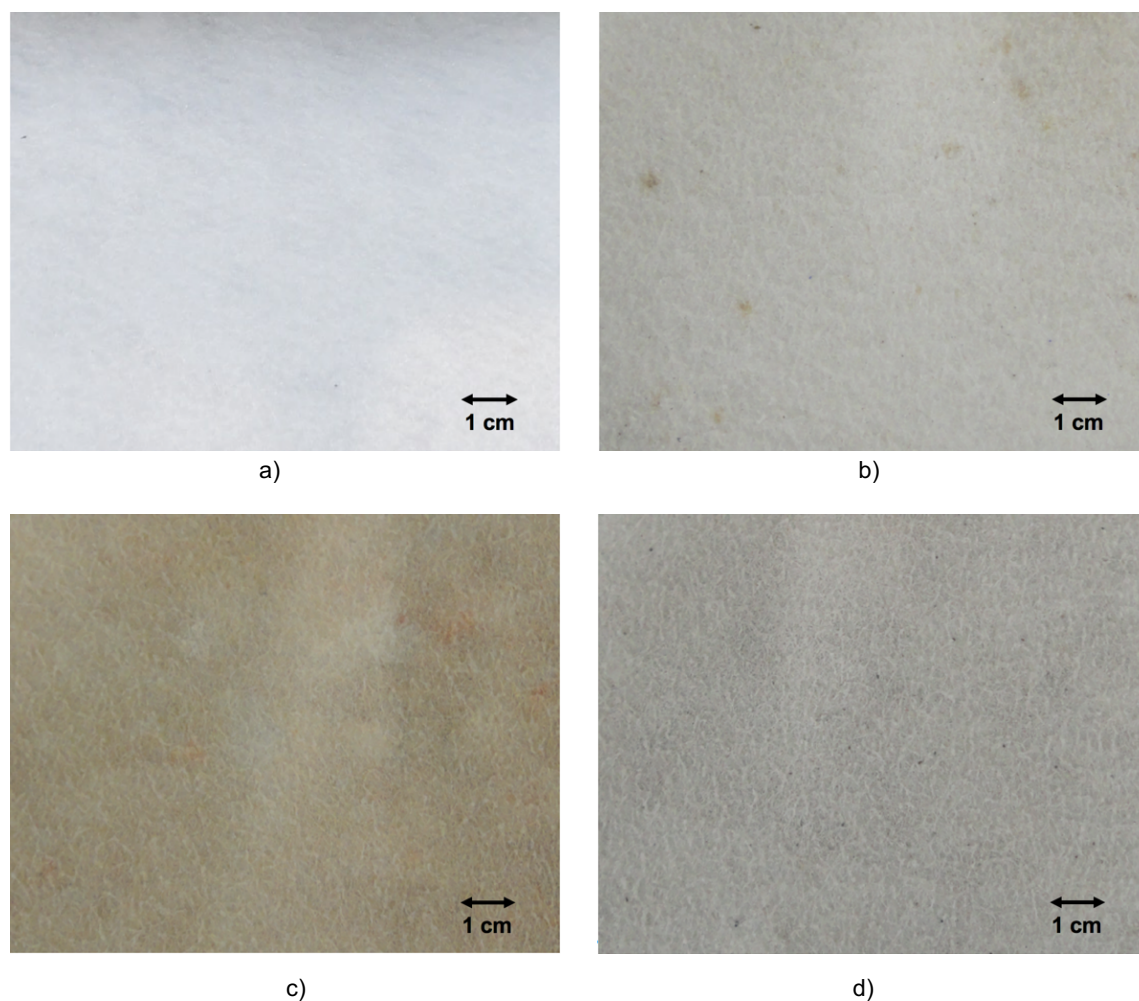


Fig. 5.1 – Geotêxtil não-tecido GTX400 no ensaio com base rígida: a) Intacto; b) Danificação com *corundum*; c) Danificação com RCD cerâmico; d) Danificação com brita 14/20

## 5.2.2. ENSAIOS COM BASE RÍGIDA

### 5.2.2.1. Ensaio de tração

Na tabela seguinte estão representados os valores médios da resistência à tração e da extensão na força máxima do geotêxtil GTX400 antes e após a danificação pelos agregados na base rígida. A resistência à tração residual é, um parâmetro fundamental para a avaliação das perdas de resistência dos materiais.

Tabela 5.1 – Valores obtidos nos ensaios de tração do geotêxtil GTX400 antes e após os ensaios de danificação mecânica na base rígida

Geotêxtil GTX400	T [kN/m]	$\varepsilon_{FM}$ [%]	RTR [%]
Não danificado	29,49 (8,7%)	82,7 (5,1%)	-
<i>Corundum</i>	23,22 (9,8%)	55,9 (7,9%)	78,7
RCD cerâmico	28,99 (3,0%)	70,6 (4,6%)	98,3
Brita 14/20	25,54 (7,5%)	62,0 (6,9%)	86,6

(entre parêntesis encontram-se os valores dos coeficientes de variação obtidos)



De modo a completar a avaliação da danificação na base rígida do geotêxtil GTX400, estão representadas no gráfico da Fig. 5.2 as curvas médias do ensaio de tração.

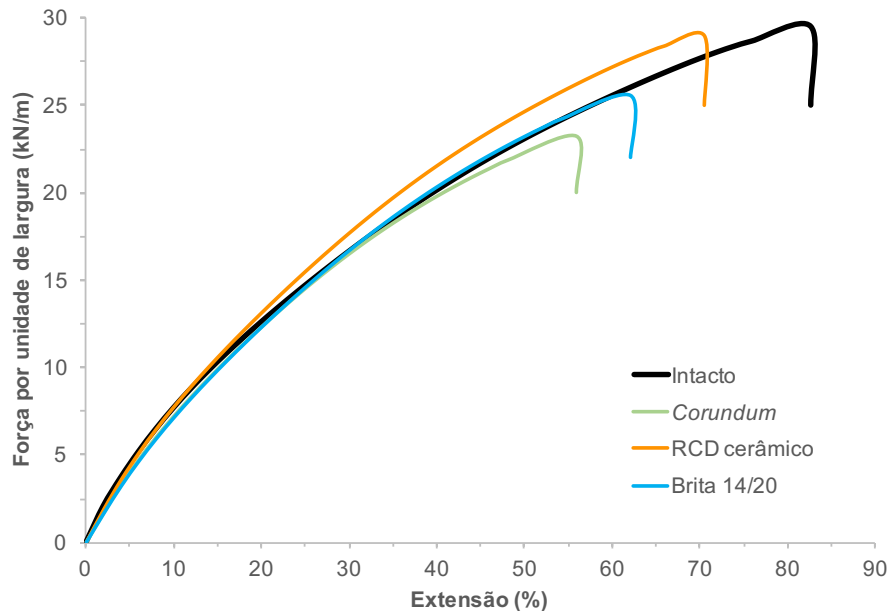


Fig. 5.2 – Curvas médias força-extensão do geotêxtil GTX400 antes e após os ensaios de danificação mecânica na base rígida

Numa primeira observação dos resultados obtidos, o *corundum* foi o agregado que induziu maior redução da resistência à tração e da extensão na força máxima do geotêxtil GTX400. Apesar de não ser uma danificação muito acentuada (RTR de 78,7 %), é um valor significativo. O RCD cerâmico, ao contrário do *corundum*, foi o agregado que causou uma menor danificação e o geotêxtil manteve a sua resistência à tração praticamente inalterada (RTR de 98,3%). A brita 14/20 teve efeitos intermédios entre o *corundum* e o RCD cerâmico, induzindo uma perda de resistência à tração de 13,4%. Quanto maior a redução da resistência à tração provocada por cada agregado, maior foi a diminuição da respetiva extensão na força máxima.

Pela análise das curvas médias força-extensão pode-se verificar visualmente que, a extensões baixas não existiram grandes variações de rigidez do geotêxtil.

#### 5.2.2.2. Ensaio de punçoamento estático

A Tabela 5.2 resume os valores médios dos parâmetros obtidos no ensaio de punçoamento estático. A avaliação da danificação é complementada com um gráfico de curvas força-deslocamento médias (Fig. 5.3), permitindo assim, analisar visualmente o comportamento do geotêxtil GTX400 no ensaio de punçoamento estático após a danificação na base rígida.

Tabela 5.2 – Valores obtidos nos ensaios de punção estático do geotêxtil GTX400 antes e após os ensaios de danificação mecânica na base rígida

Geotêxtil GTX400	F <sub>P</sub> [N]	h <sub>P</sub> [mm]	RPR [%]
Não danificado	5388 (2,8%)	55,1 (1,2%)	-
<i>Corundum</i>	4289 (9,9%)	46,3 (3,3%)	79,6
RCD cerâmico	5125 (4,6%)	51,8 (4,1%)	95,1
Brita 14/20	4394 (6,2%)	48,0 (6,9%)	81,6

(entre parêntesis encontram-se os valores dos coeficientes de variação obtidos)

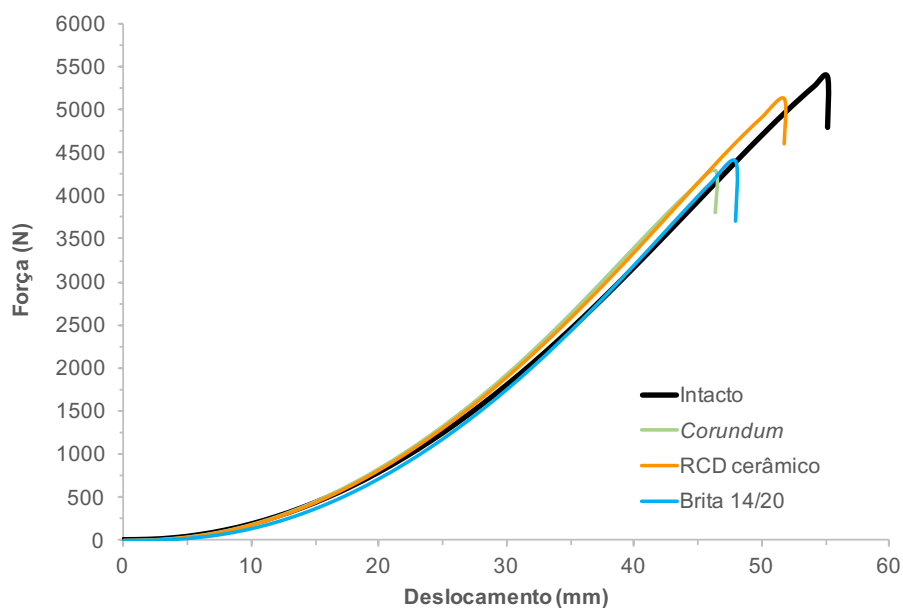


Fig. 5.3 – Curvas médias força-deslocamento do geotêxtil GTX400 antes e após os ensaios de danificação mecânica na base rígida

Observando os resultados obtidos na resistência ao punçãoamento residual, pode-se afirmar que as danificações causadas pelo RCD cerâmico no geotêxtil GTX400, sobre a base rígida, não foram significativas (RPR de 95,1%). O *corundum* e a brita 14/20 foram os agregados que provocaram uma maior danificação, induzindo uma perda de resistência ao punçãoamento residual de 20,4% e 18,4%, respectivamente. Comparando a capacidade resistente do geotêxtil GTX400, ensaiado na base rígida, à tração e ao punçãoamento, pode-se destacar a coerência da danificação com os diferentes agregados.

### 5.2.3. ENSAIOS COM BASE FLEXÍVEL COM ÍNDICE DE COMPACIDADE DE 50%

#### 5.2.3.1. Ensaio de tração

Os valores médios da resistência à tração e da extensão na força máxima do geotêxtil GTX400 antes e após a danificação pelos diferentes agregados na base flexível com índice de compactação de 50% estão apresentados na Tabela 5.3. A resistência à tração residual é, também, um parâmetro calculado e representado na tabela seguinte.



Tabela 5.3 – Valores obtidos nos ensaios de tração do geotêxtil GTX400 antes e após os ensaios de danificação mecânica na base flexível com índice de compactação de 50%

Geotêxtil GTX400	T [kN/m]	$\varepsilon_{FM}$ [%]	RTR [%]
Não danificado	29,49 (8,7%)	82,7 (5,1%)	-
Corundum	23,44 (7,6%)	56,9 (5,1%)	79,5
RCD cerâmico	27,91 (4,1%)	65,0 (5,7%)	94,6
Brita 14/20	25,88 (8,4%)	61,0 (5,7%)	87,8

(entre parêntesis encontram-se os valores dos coeficientes de variação obtidos)

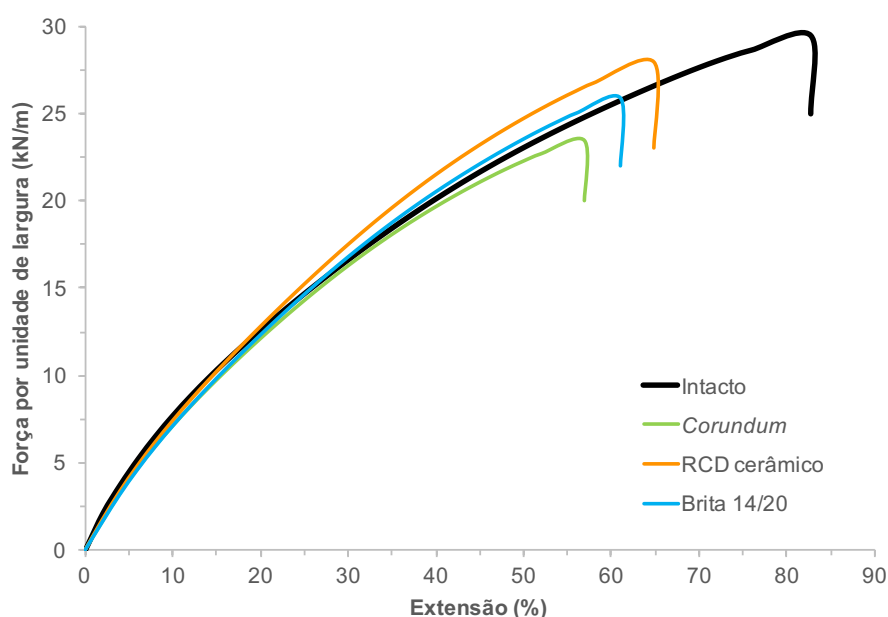


Fig. 5.4 – Curvas médias força-estiramento do geotêxtil GTX400 antes e após os ensaios de danificação mecânica na base flexível com índice de compactação de 50%

Verificou-se que o *corundum* provocou uma perda de resistência à tração de 20,5%, sendo assim o agregado que induziu maiores danos no geotêxtil GTX400. O RCD cerâmico induziu uma perda de resistência superior à obtida nos ensaios com base rígida (1,7%), no valor de 5,4%, enquanto que a brita 14/20 causou uma perda de resistência à tração de 12,2%, ligeiramente inferior aos resultados com a base rígida (13,4%). A extensão na força máxima dos provetes danificados com *corundum* e brita 14/20 não sofreu muitas alterações comparativamente às extensões obtidas no ensaio com base rígida. Contudo, para o RCD cerâmico a extensão diminuiu no ensaio com a base flexível com índice de compactação de 50% (de 82,7% para 65,0%) relativamente à extensão obtida com a base rígida (de 82,7% para 70,6%).

As curvas médias força-estiramento, analogamente às curvas apresentadas com a base rígida, permitem confirmar que a rigidez do geotêxtil não apresentou variações significativas para extensões baixas e que as extensões na força máxima das amostras danificadas tiveram valores mais próximos do que as extensões das amostras ensaiadas na base rígida.

De um modo geral, as danificações com os diferentes agregados na base rígida e na base flexível com índice de compactidade de 50% tiveram efeitos idênticos nas propriedades de tração do geotêxtil GTX400.

### 5.2.3.2. Ensaio de punçoamento estático

Os valores médios da força máxima e do deslocamento na força máxima, assim como os valores da resistência ao punçoamento residual estão apresentados na Tabela 5.4 e as respectivas curvas médias na Figura 5.5.

Tabela 5.4 – Valores obtidos nos ensaios de punçoamento estático do geotêxtil GTX400 antes e após os ensaios de danificação mecânica na base flexível com índice de compactidade de 50%

Geotêxtil GTX400	$F_P$ [N]	$h_P$ [mm]	RPR [%]
Não danificado	5388 (2,8%)	55,1 (1,2%)	-
<i>Corundum</i>	4175 (9,3%)	47,5 (4,2%)	77,5
RCD cerâmico	5168 (4,6%)	49,5 (3,1%)	95,9
Brita 14/20	4807 (8,9%)	49,5 (2,1%)	89,2

(entre parêntesis encontram-se os valores dos coeficientes de variação obtidos)

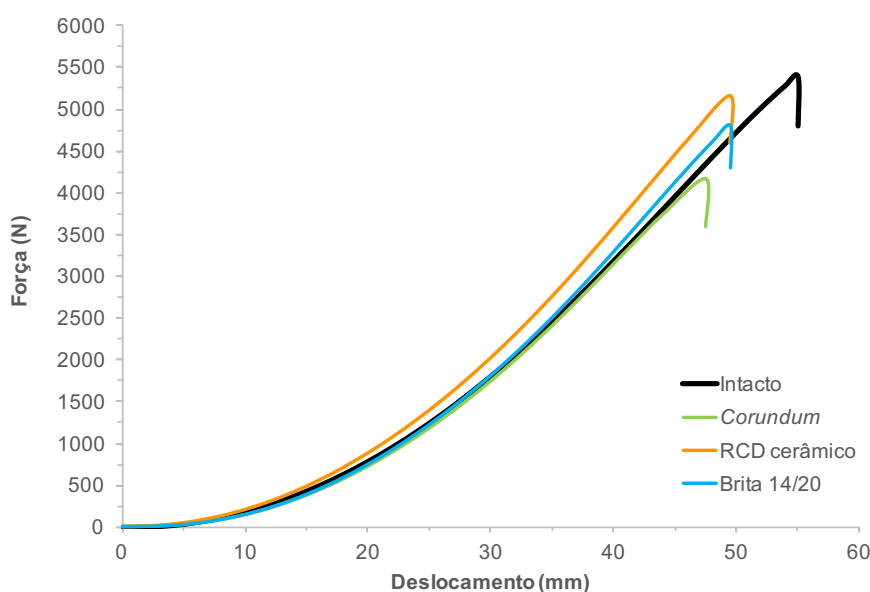


Fig. 5.5 – Curvas médias força-deslocamento do geotêxtil GTX400 antes e após os ensaios de danificação mecânica na base flexível com índice de compactação de 50%

O *corundum* foi, novamente, o agregado mais danoso para o geotêxtil, provocando uma perda da capacidade resistente de 22,5% e uma diminuição no deslocamento na força máxima de 55,1 mm para 47,5 mm. Em comparação com os ensaios realizados com o geotêxtil GTX400 na base rígida, pode-se afirmar que os valores obtidos foram semelhantes com os agregados *corundum* e RCD cerâmico. O RCD cerâmico induziu uma diminuição da resistência ao punçoamento de 4,1% (pouco significativa) e

o deslocamento na força máxima teve o mesmo valor que na danificação com a brita 14/20 (49,5%). A brita 14/20, com a utilização da base flexível com índice de compacidade de 50%, causou uma perda de resistência ao punçoamento de 10,8%, inferior à perda provocada nos ensaios com a base rígida (18,4%).

Comparando a capacidade resistente do geotêxtil GTX400 (à tração e ao punçoamento) ensaiado na base rígida e na base com índice de compacidade de 50%, não se verificaram diferenças significativas na danificação causada pelos agregados.

#### 5.2.4. ENSAIOS COM BASE FLEXÍVEL COM ÍNDICE DE COMPACIDADE DE 80%

##### 5.2.4.1. Ensaio de tração

Os valores médios dos parâmetros obtidos no ensaio de tração e a resistência à tração residual estão representados na Tabela 5.5 e as respectivas curvas médias na Fig. 5.6.

Tabela 5.5 – Valores obtidos nos ensaios de tração do geotêxtil GTX400 antes e após os ensaios de danificação mecânica na base flexível com índice de compacidade de 80%

Geotêxtil GTX400	T [kN/m]	$\varepsilon_{FM}$ [%]	RTR [%]
Não danificado	29,49 (8,7%)	82,7 (5,1%)	-
<i>Corundum</i>	22,45 (5,4%)	50,9 (5,0%)	76,1
RCD cerâmico	27,70 (6,8%)	65,7 (4,4%)	93,9
Brita 14/20	26,87 (7,9%)	61,2 (8,8%)	91,1

(entre parêntesis encontram-se os valores dos coeficientes de variação obtidos)

O *corundum* foi, novamente, o agregado que mostrou ser mais danoso no geotêxtil GTX400 induzindo perdas de capacidade resistente (23,9%) ligeiramente superiores às ocorridas nas restantes bases (21,3% na base rígida e 20,5% na base com índice de compacidade de 50%), todavia a proximidade dos valores mostra que não existe uma variação significativa da danificação nas diferentes bases com este agregado.

O RCD cerâmico causou uma perda de resistência à tração superior (6,1%) à ocorrida nos ensaios com as duas bases anteriores (1,7% com a base rígida e 5,4% com a base com índice de compacidade 50%), verificando-se assim que a capacidade resistente do geotêxtil diminuiu de forma idêntica nos ensaios realizados nas bases flexíveis. Ao contrário dos outros agregados, a perda da resistência à tração residual induzida pela brita 14/20 foi inferior na base flexível com índice de compacidade de 80% (8,9%) em relação aos valores obtidos com o mesmo agregado para as restantes bases de danificação.

A extensão na força máxima dos provetes danificados com *corundum* na base flexível com índice de compacidade 80% foi inferior (de 82,7% para 50,9%) comparativamente às restantes bases (de 82,7% para 55,9% e 56,9%, nomeadamente na base rígida e na base flexível com índice de compacidade de 50%). Contudo, as extensões na força máxima das amostras danificadas com RCD cerâmico e brita 14/20 foram semelhantes às obtidas nos ensaios com a base flexível com índice de compacidade de 50%.

As curvas médias força-extensão eram idênticas para as extensões mais baixas, ou seja, a rigidez não apresentou variações com grande significado. Através da análise da Fig. 5.6, pode-se afirmar que o *corundum* foi o agregado mais danoso, enquanto que o RCD cerâmico e a brita 14/20 apresentaram curvas com características semelhantes na danificação do geotêxtil GTX400.

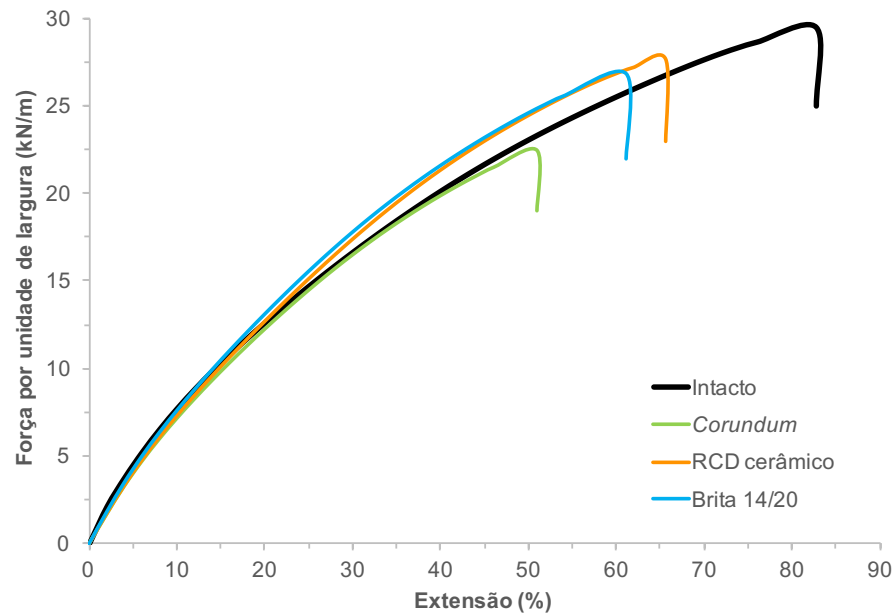


Fig. 5.6 – Curvas médias força-extensão do geotêxtil GTX400 antes e após os ensaios de danificação mecânica na base flexível com índice de compactação 80%

A Fig. 5.7 compara as resistências à tração residuais do geotêxtil GTX400 após danificação com os três agregados nas diferentes bases.

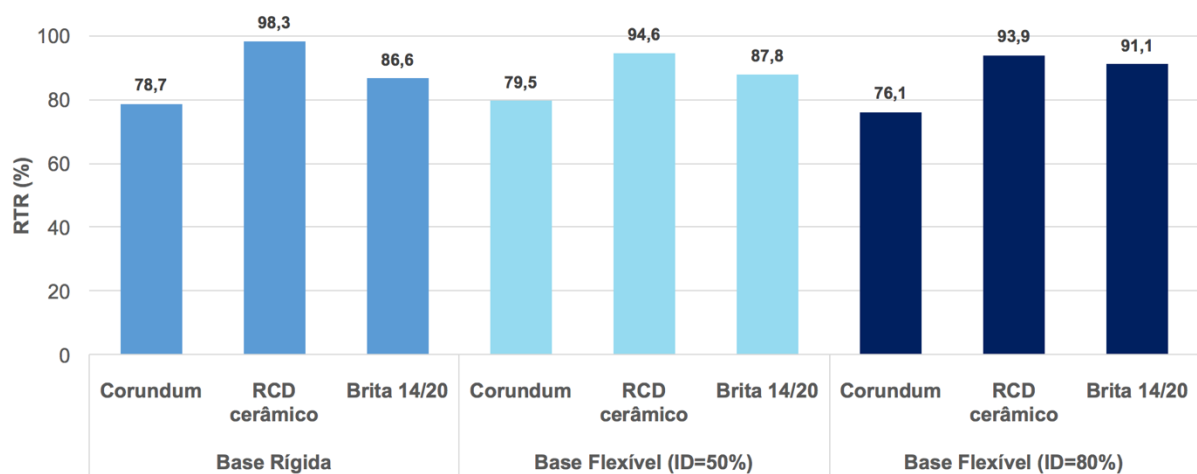


Fig. 5.7 – Resistência à tração residual do geotêxtil GTX400 nas diferentes bases de ensaio

Fazendo uma análise geral da Fig. 5.7, pode-se concluir que, independentemente da base de ensaio, o *corundum* foi o agregado que induziu uma maior redução da resistência à tração do geotêxtil GTX400, enquanto que o RCD cerâmico provocou uma redução menor. Para o mesmo agregado nas diferentes bases de ensaio os efeitos nas propriedades do geotêxtil GTX400 não diferiram muito. Como as alterações das propriedades à tração no geotêxtil não foram muito significativas, a sua função de proteção da geomembrana não foi comprometida.

Assim, pode-se concluir que, para as bases estudadas, o geotêxtil é capaz de proteger a geomembrana. Quanto à implementação deste geotêxtil em obra, em termos de danificação mecânica induzida aos geossintéticos, os resultados laboratoriais não excluem essa possibilidade. É de referir também que, como material granular de aterro, é mais vantajoso o uso do RCD cerâmico não só por induzir uma pequena redução da resistência à tração do geotêxtil como pela reutilização de recursos e redução das matérias-primas.

#### 5.2.4.2. Ensaio de punçoamento estático

Os valores médios das propriedades do geotêxtil GTX400 obtidos no ensaio de punçoamento, antes e após da danificação mecânica sobre a base flexível com índice de compacidade de 80%, são exibidos na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Valores obtidos nos ensaios de punçoamento estático do geotêxtil GTX400 antes e após os ensaios de danificação mecânica na base flexível com índice de compacidade de 80%

Geotêxtil GTX400	F <sub>P</sub> [N]	h <sub>p</sub> [mm]	RPR [%]
Não danificado	5388 (2,8%)	55,1 (1,2%)	-
<i>Corundum</i>	3557 (12,4%)	43,2 (4,1%)	66,0
RCD cerâmico	5061 (4,1%)	50,2 (2,5%)	93,9
Brita 14/20	4701 (6,1%)	49,7 (3,5%)	87,3

(entre parêntesis encontram-se os valores dos coeficientes de variação obtidos)

O geotêxtil GTX400 sofreu uma maior redução da resistência ao punçoamento com o *corundum*, na base flexível com índice de compacidade de 80% (redução de 34,0%) do que nas restantes bases (diminuições de 20,5% e 22,5% na base rígida e na base com índice de compacidade de 80%, respetivamente). O RCD cerâmico e a brita 14/20 foram os agregados que provocaram uma menor redução da resistência ao punçoamento no geotêxtil GTX400 (reduções de 6,1% e 12,7%, respetivamente).

No que diz respeito ao deslocamento na força máxima, pode-se verificar que, para o RCD cerâmico e para a brita 14/20, a variação foi idêntica, ou seja, de 55,1 mm para 50,2 mm (RCD cerâmico) e 49,7 mm (brita 14/20). Outro ponto a salientar é a uniformidade da perda de resistência ao punçoamento do geotêxtil quando danificado com RCD cerâmico nas três diferentes bases (capacidade resistente com valores entre 93,9% e 95,9%).

Através das curvas médias (Fig. 5.8), podemos identificar rapidamente a proximidade e semelhança dos efeitos induzidos ao geotêxtil GTX400 pelo RCD cerâmico e pela brita 14/20. É de realçar, também, o aumento da danificação causada pelo *corundum* comparativamente aos restantes agregados.

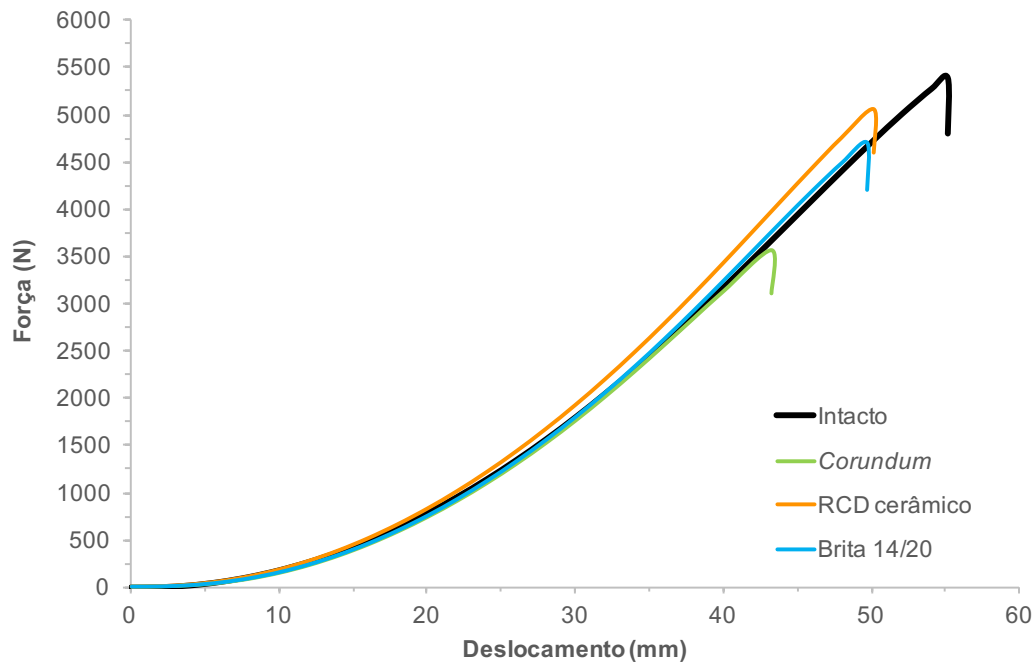


Fig. 5.8 – Curvas médias força-deslocamento do geotêxtil GTX400 antes e após os ensaios de danificação mecânica na base flexível com índice de compacidade de 80%

O gráfico da Fig. 5.9 permite concluir que o *corundum* provocou uma diminuição da resistência ao punçoamento do geotêxtil superior nos ensaios realizados com a base flexível com índice de compacidade de 80%. Na base rígida e na base flexível com índice de compacidade de 50%, os valores da resistência ao punçoamento foram superiores e bastante semelhantes às resistências obtidas para os ensaios de tração. A danificação com o RCD cerâmico não mostrou grandes variações na resistência à tração e ao punçoamento do geotêxtil GTX400.

O geotêxtil GTX400 apresentou uma boa resistência aos ensaios de degradação. Perante os valores de resistência residual obtidos, o uso de RCD cerâmico como material granular do aterro é uma opção a ser ponderada, uma vez que não existiram alterações significativas das propriedades do geotêxtil após o ensaio de degradação com este agregado.

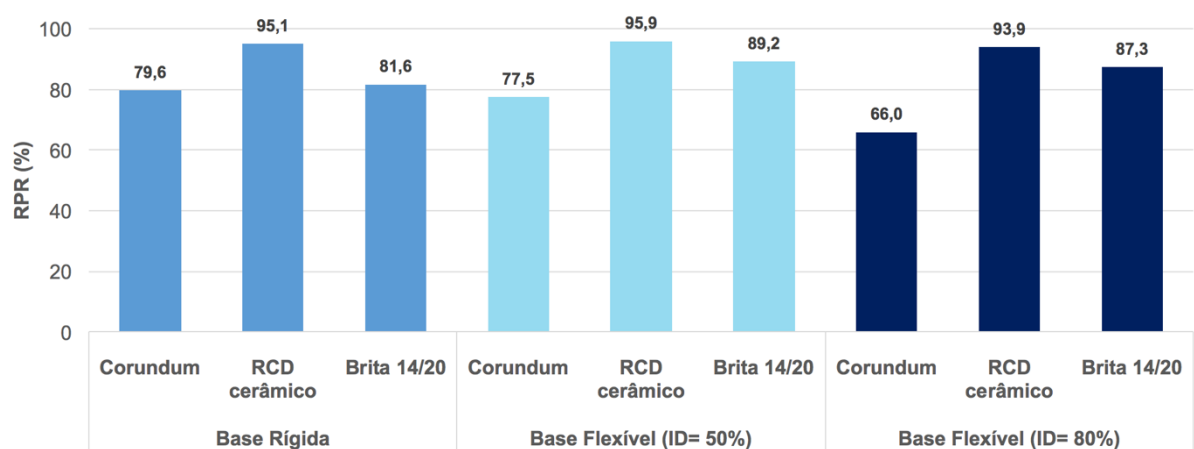


Fig. 5.9 – Resistência ao punçoamento residual do geotêxtil GTX400 nas diferentes bases de ensaio

### 5.3. GEOTÊXTIL NÃO-TECIDO GTX300

#### 5.3.1. ENSAIO EM CONJUNTO

##### 5.3.1.1. Inspeção visual

Apesar de ter uma MUA inferior, o geotêxtil GTX300 (Fig. 5.10) apresentou alterações visuais idênticas ao geotêxtil GTX400, ou seja, não sofreu alterações significativas após os ensaios de danificação mecânica com a base rígida. A forma angular do *corundum* e do RCD cerâmico provocou alguns punçoamentos no material e a fragmentação dos agregados durante o ensaio de danificação mecânica provocou a acumulação de alguma sujeira no material. Relativamente às restantes bases, o comportamento do geotêxtil GTX300 foi semelhante ao comportamento do geotêxtil GTX400 no ensaio de danificação mecânica na base rígida.

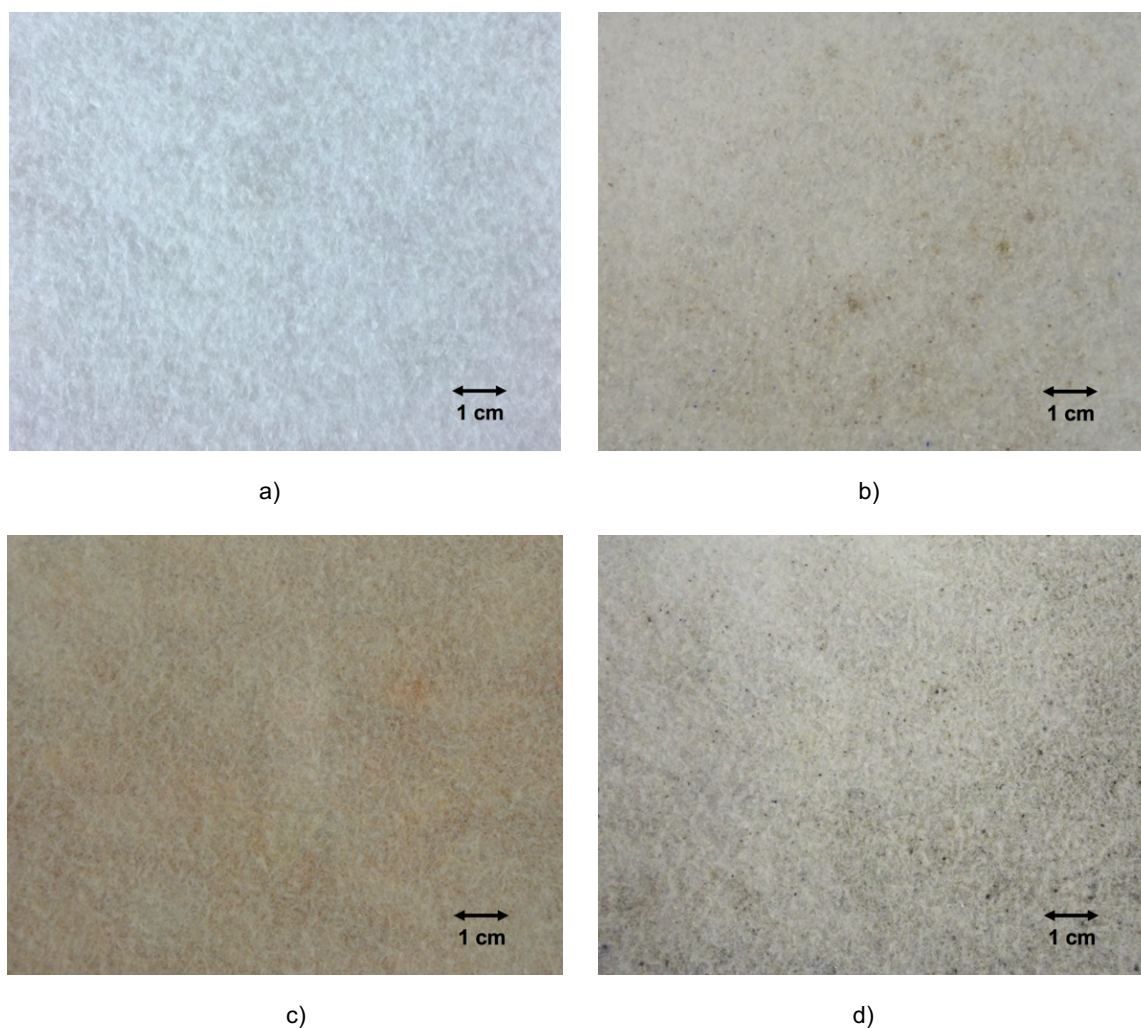


Fig. 5.10 – Geotêxtil não-tecido GTX300 no ensaio com base rígida: a) Intacto; b) Danificação com *corundum*; c) Danificação com RCD cerâmico; d) Danificação com brita 14/20

## 5.3.1.2. Ensaio de tração

A média da resistência à tração e da extensão na força máxima das amostras intactas e danificadas pelos diferentes agregados na base rígida estão apresentados na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 – Valores obtidos nos ensaios de tração do geotêxtil GTX300 antes e após os ensaios de danificação mecânica na base rígida

Geotêxtil GTX300	T [kN/m]	$\varepsilon_{FM}$ [%]	RTR [%]
Não danificado	25,09 (5,7%)	78,9 (8,8%)	-
<i>Corundum</i>	17,94 (6,9%)	51,9 (12,9%)	77,8
RCD cerâmico	22,49 (6,3%)	62,7 (9,8%)	97,1
Brita 14/20	21,01 (13,1%)	59,9 (13,6%)	97,7

(entre parêntesis encontram-se os valores dos coeficientes de variação obtidos)

A resistência à tração residual do geotêxtil após a danificação com *corundum* diminuiu 28,5%, enquanto que com RCD cerâmico e brita 14/20 não sofreu alterações significativas (RTR de 89,7% e 83,7%). A extensão na força máxima diminuiu de 78,9% para 62,7% e para 59,9%, nomeadamente, no ensaio realizado com RCD cerâmico e com brita 14/20. A danificação com o *corundum* provocou uma diminuição da extensão na força máxima superior aos restantes agregados, de 78,9% para 51,9%. Comparativamente ao geotêxtil GTX400, o geotêxtil GTX300 apresentou valores de resistência à tração residual ligeiramente inferiores após a danificação mecânica.

As curvas médias força-extensão (Fig. 5.11) permitem confirmar o que se referiu anteriormente, o RCD cerâmico e a brita 14/20 apresentam curvas com características semelhantes, e pode-se verificar que, para extensões baixas não existiram grandes variações de rigidez do geotêxtil.

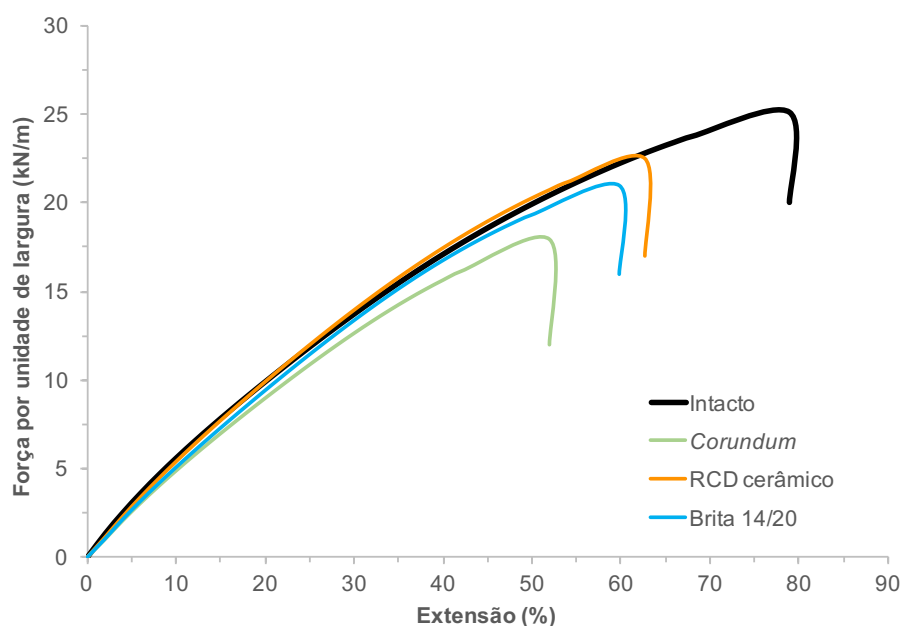


Fig. 5.11 – Curvas médias força-extensão do geotêxtil GTX300 antes e após os ensaios de danificação mecânica na base rígida



### 5.3.1.3. Ensaio de punçoamento estático

Os valores médios dos resultados obtidos no ensaio de punçoamento estático do geotêxtil GTX300 estão representados na Tabela 5.8 e nas curvas da Fig. 5.12.

Tabela 5.8 – Valores obtidos nos ensaios de punçoamento estático do geotêxtil GTX300 antes e após os ensaios de danificação mecânica na base rígida

Geotêxtil GTX300	$F_P$ [N]	$h_P$ [mm]	RPR [%]
Não danificado	5051 (12,8%)	58,4 (2,1%)	-
<i>Corundum</i>	3482 (8,7%)	46,7 (2,4%)	68,9
RCD cerâmico	4517 (8,1%)	51,9 (2,6%)	89,4
Brita 14/20	4143 (9,2%)	49,2 (2,6%)	82,0

(entre parêntesis encontram-se os valores dos coeficientes de variação obtidos)

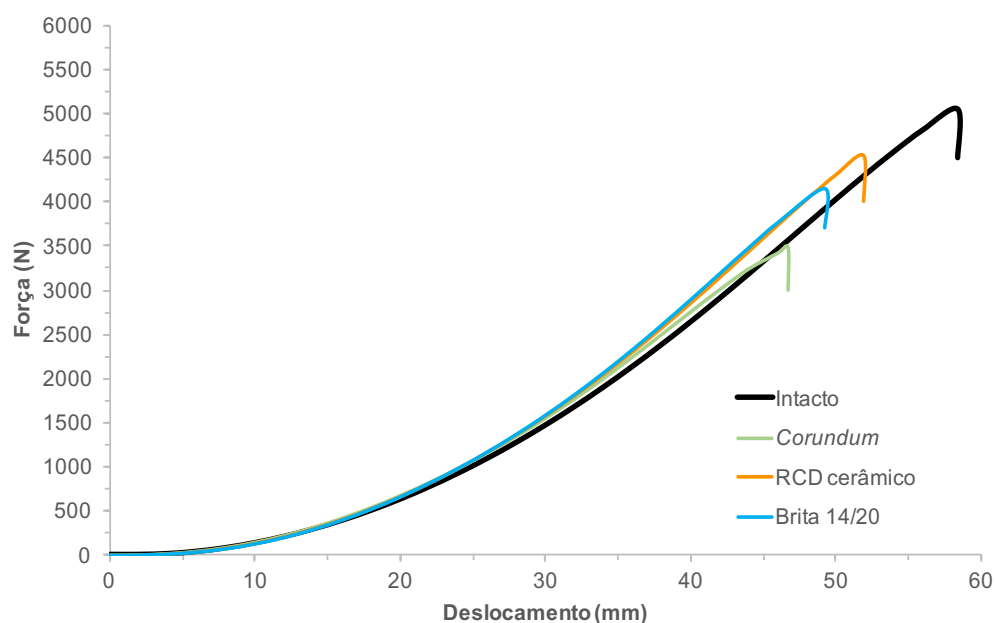


Fig. 5.12 – Curvas médias força-deslocamento do geotêxtil GTX300 antes e após os ensaios de danificação mecânica na base rígida

Assim como foi observado até este subponto, o *corundum* foi o agregado que provocou uma maior diminuição na resistência ao punçoamento do geotêxtil GTX300 (redução de 31,1%). O RCD cerâmico provocou uma perda de resistência ao punçoamento de 10,6% e a capacidade resistente do geotêxtil na danificação induzida pela brita 14/20 teve uma perda de 18,0%.

Comparativamente com o geotêxtil GTX400, nas mesmas condições, o geotêxtil GTX300 apresentou perdas de resistência ao punçoamento maiores na danificação com *corundum* e com o RCD cerâmico. A diferença na resistência ao punçoamento residual dos dois geotêxteis após a danificação com brita 14/20 não foi significativa.

### 5.3.2. ENSAIO ISOLADO

#### 5.3.2.1. Inspeção visual

As alterações do aspeto do geotêxtil GTX300 quando ensaiado isoladamente não foram muito diferentes das alterações que ocorreram para os geotêxteis GTX300 e GTX400 nos ensaios em conjunto com a geomembrana e o geocompósito. De um modo geral a fragmentação dos agregados durante o ensaio de danificação mecânica na base rígida originou a acumulação de sujidade no material, sendo mais evidente com o RCD cerâmico devido à tonalidade que o geotêxtil obteve após o ensaio. Também existiram alguns punçoamentos pontuais provocados pelo *corundum* e o RCD cerâmico, devido à forma angular dos agregados, contudo não foram significativos.

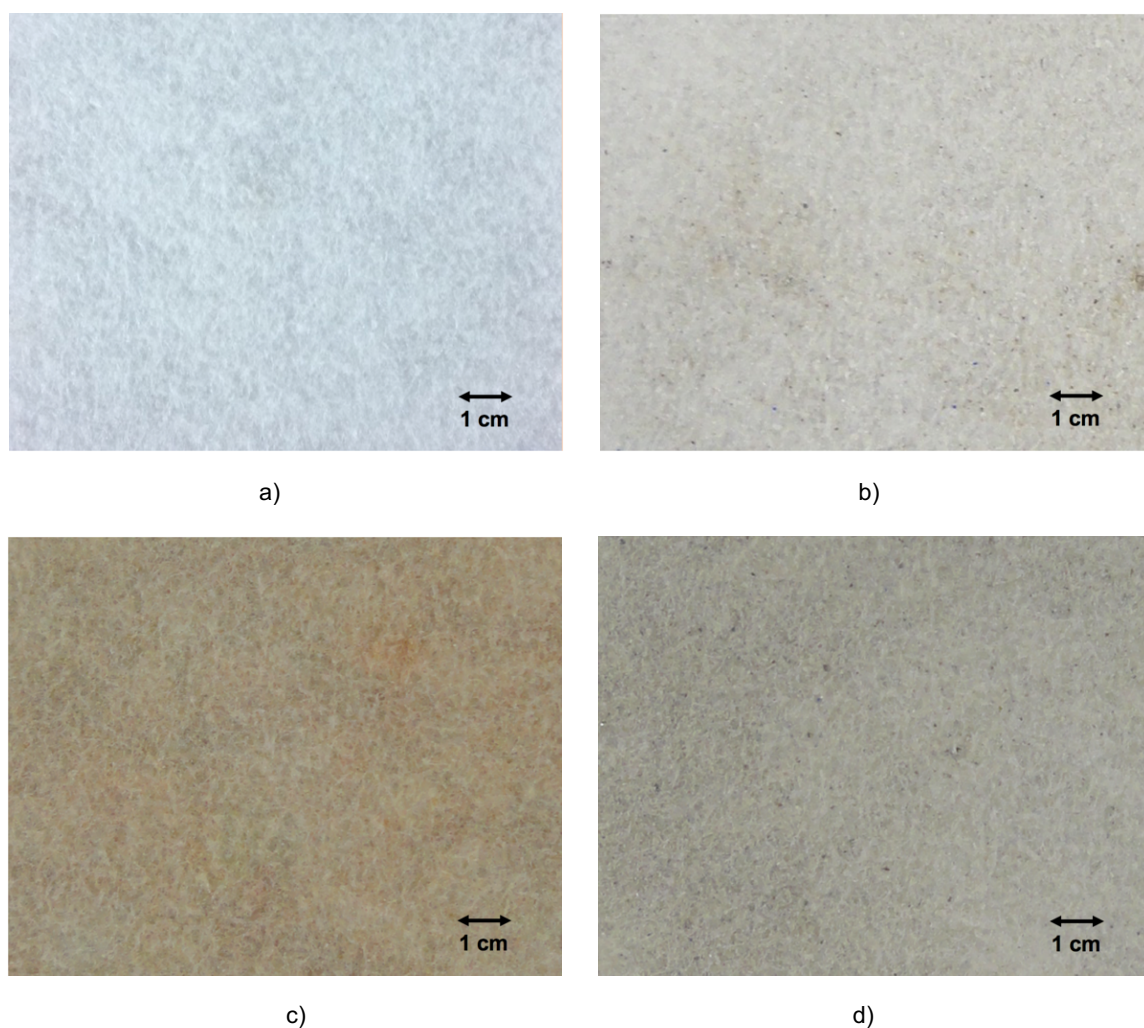


Fig. 5.13 – Geotêxtil não-tecido GTX300 ensaiado isoladamente na base rígida: a) Intacto; b) Danificação com *corundum*; c) Danificação com RCD cerâmico; d) Danificação com brita 14/20

### 5.3.2.2. Ensaio de tração

Na Tabela 5.9 encontram-se os parâmetros do ensaio de tração que foram obtidos após o ensaio de danificação realizado apenas com o geotêxtil GTX300.

Tabela 5.9 – Valores obtidos nos ensaios de tração do geotêxtil GTX300 antes e após os ensaios de danificação mecânica na base rígida (ensaio de danificação realizado apenas com o geotêxtil)

Geotêxtil GTX300	T [kN/m]	$\varepsilon_{FM}$ [%]	RTR [%]
Não danificado	25,09 (5,7%)	78,9 (8,8%)	-
<i>Corundum</i>	18,47 (4,0%)	48,2 (11,7%)	73,6
RCD cerâmico	23,33 (9,6%)	62,7 (9,5%)	93,0
Brita 14/20	19,77 (4,1%)	54,7 (5,2%)	78,8

(entre parêntesis encontram-se os valores dos coeficientes de variação obtidos)

A redução das resistências à tração residuais após o ensaio de danificação com *corundum* e com a brita 14/20 (28,1% e 20,6%, respetivamente) foram superiores à variação da resistência residual induzida pelo RCD cerâmico (8%).

Nas curvas da Fig. 5.14 podemos observar graficamente o comportamento da força por unidade de largura relativamente à extensão. No gráfico da Fig. 5.15 é possível estabelecer uma comparação do comportamento dos provetes de geotêxtil danificados ensaiados no conjunto e individualmente.

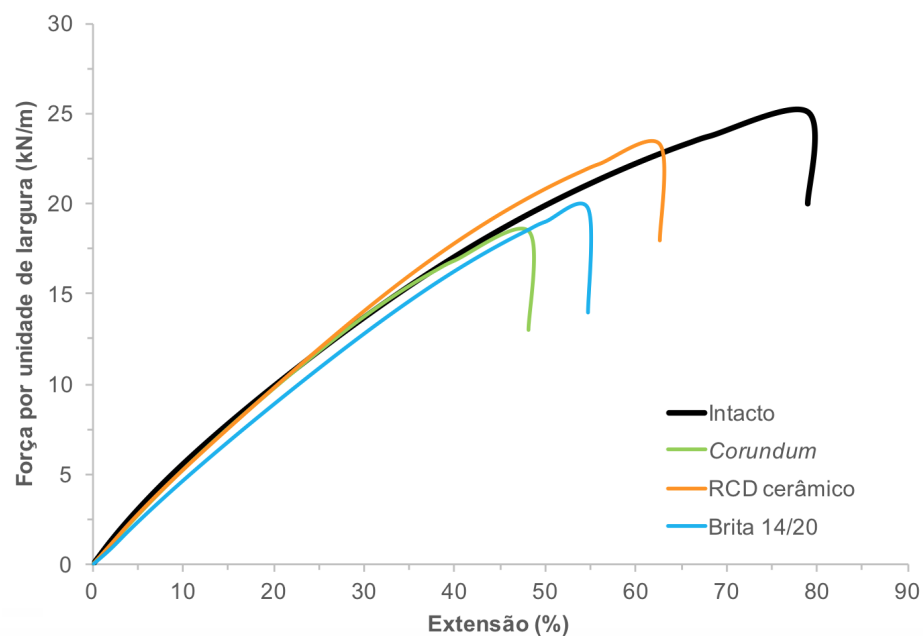


Fig. 5.14 – Curvas médias força-extensão do geotêxtil GTX300 danificado na base rígida (ensaio de danificação realizado apenas com o geotêxtil)

Visualmente, a curva média do geotêxtil GTX300 danificado com brita 14/20 permite afirmar que o *corundum* e a brita 14/20 foram os agregados mais danosos. Em semelhança com os gráficos apresentados anteriormente, as variações da rigidez do geotêxtil para as extensões baixas não foram significativas nas curvas do geotêxtil danificado com *corundum* e com RCD cerâmico. Contudo, a rigidez do geotêxtil após a danificação mecânica com a brita 14/20 foi ligeiramente inferior.

Pela análise da Fig. 5.15, o geotêxtil GTX400 apresentou variações de resistência à tração inferiores ao geotêxtil GTX300 (ensaiados em conjunto com a geomembrana e o geocompósito e ensaiado isoladamente). Entre os ensaios com os geotêxteis GTX300, o geotêxtil ensaiado em conjunto apresentou resistências à tração ligeiramente inferiores comparativamente ao geotêxtil ensaiado isoladamente, à exceção do ensaio com a brita 14/20. Porém, essas variações nos geotêxteis GTX300 não foram muito significativas.

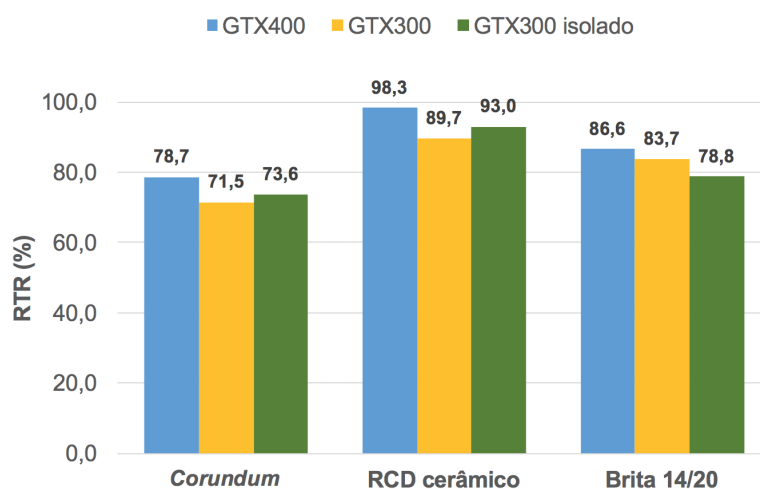


Fig. 5.15 – Resistências à tração residual dos diferentes geotêxteis

O *corundum* foi o agregado que provocou maior redução de resistência à tração nos geotêxteis e o RCD cerâmico induziu uma ligeira perda de resistência à tração nos ensaios de danificação com geotêxtil GTX300 (quer em conjunto, quer isoladamente). A brita 14/20 provocou reduções de resistência dos geotêxteis de valor intermédio. Em suma, num caso real, tendo em conta a resistência à tração dos geotêxteis, pode ser ponderada a implementação do geotêxtil GTX300 em substituição do GTX400.

#### 5.3.2.3. Ensaio de punçoamento estático

Na Tabela 5.10 encontram-se os valores médios da força máxima, deslocamento na força máxima e as resistências ao punçoamentos residuais obtidos após o ensaio de danificação realizado apenas com o geotêxtil GTX300.

Tabela 5.10 – Valores obtidos nos ensaios de punçoamento estático do geotêxtil GTX300 antes e após os ensaios de danificação mecânica na base rígida (ensaio de danificação realizado apenas com o geotêxtil)

Geotêxtil GTX300	$F_P$ [N]	$h_P$ [mm]	RPR [%]
Não danificado	5051 (12,8%)	58,4 (2,1%)	-
<i>Corundum</i>	3356 (5,1%)	45,3 (1,9%)	66,4
RCD cerâmico	4082 (7,0%)	52,2 (4,4%)	80,8
Brita 14/20	4328 (5,9%)	52,4 (3,3%)	85,7

(entre parêntesis encontram-se os valores dos coeficientes de variação obtidos)

O *corundum* não provocou perdas na resistência ao punçoamento significativas (33,6%), relativamente às perdas com o mesmo agregado no geotêxtil GTX300 ensaiado em conjunto (31,1%). O RCD cerâmico provocou uma maior redução na capacidade resistente à tração do material (19,2%), comparativamente ao mesmo geotêxtil ensaiado com os restantes geossintéticos (10,6%). A brita 14/20 foi o agregado que provocou uma menor alteração nas propriedades à tração no geotêxtil, com a perda de resistência à tração de 14,3%. O deslocamento na força máxima no ensaio com brita 14/20 (52,4 mm) foi semelhante ao deslocamento obtido no ensaio com RCD cerâmico (52,2 mm). Pela análise do gráfico da Fig. 5.16 é de salientar a proximidade das curvas médias do geotêxtil danificado com RCD cerâmico e com a brita 14/20, correspondendo a danificações semelhantes.

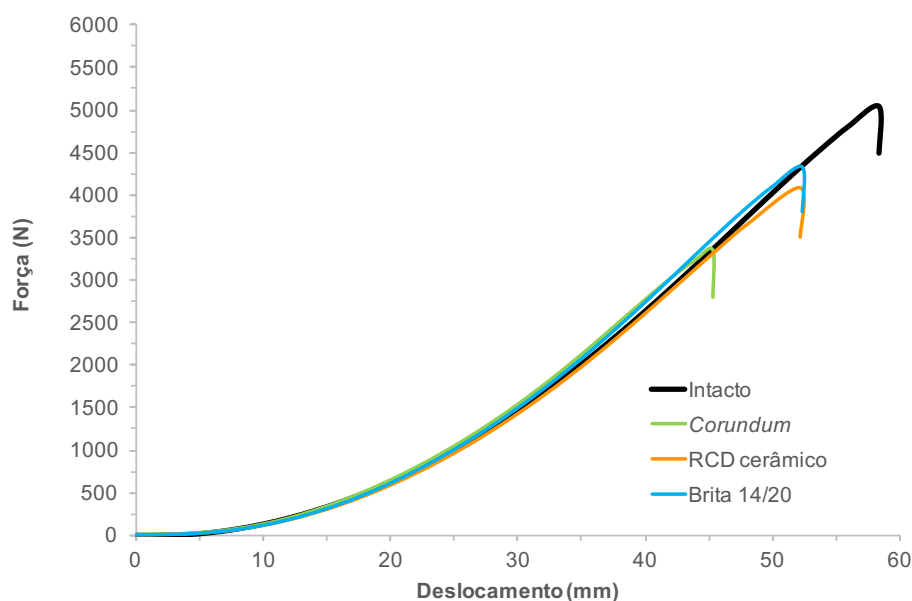


Fig. 5.16 – Curvas médias força-deslocamento do geotêxtil GTX300 antes e após os ensaios de danificação mecânica na base rígida (ensaio de danificação realizado apenas com o geotêxtil)

Pela observação da Fig. 5.17, pode-se retirar conclusões comparando os ensaios de punçoamento estático realizados nos geotêxteis. Pode-se verificar que o *corundum* foi o agregado que induziu maior alteração nas propriedades dos geotêxteis, não existindo uma variação muito significativa entre as

resistências ao punçoamento do geotêxtil GTX300 e GTX300 isolado. O RCD cerâmico provocou menores reduções das resistências ao punçoamento, não sendo muito relevante para o geotêxtil GTX400. A brita 14/20 provocou uma redução da resistência ao punçoamento idêntica em todos os geotêxteis.

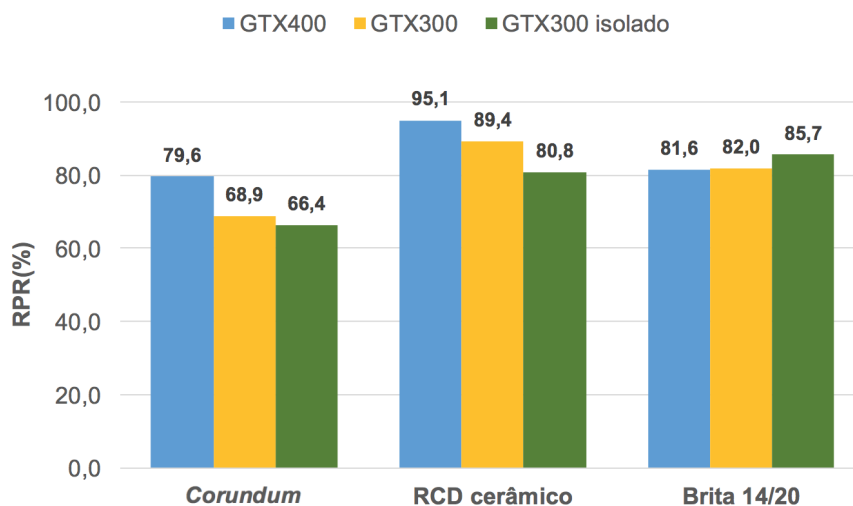


Fig. 5.17 – Resistências ao punçoamento residual dos diferentes geotêxteis

Deste modo, conclui-se que o GTX400 foi o geotêxtil mais resistente à danificação mecânica e que não existiram muitas diferenças na resistência ao punçoamento dos geotêxteis GTX300 quando ensaiado em conjunto ou isolado. Tendo em conta estas resistências residuais, poderia ser ponderada a implementação do geotêxtil GTX300 em obra, sem comprometer a sua função de proteção da geomembrana.

## 5.4. GEOMEMBRANA

### 5.4.1. INSPEÇÃO VISUAL

A geomembrana é o elemento fundamental para a impermeabilização de um aterro de resíduos, sendo este o material mais importante na avaliação da danificação. Essa importância advém da impossibilidade da geomembrana exercer a sua função de barreira de fluidos se existir algum corte ou perfuração na mesma.

Os danos visíveis na geomembrana (Fig. 5.18), tanto com o geotêxtil de proteção GTX400 como com o geotêxtil GTX300, foram diferentes dependendo do agregado utilizado no ensaio de danificação mecânica. Enquanto que a danificação provocada pelo *corundum* foi inexistente, o RCD cerâmico e a brita 14/20 provocaram alguns punçoamentos pontuais, porém não colocaram em causa a impermeabilidade do material. Os danos detetáveis visualmente após a danificação provocada pelos agregados foram semelhantes em todas as bases de ensaio.



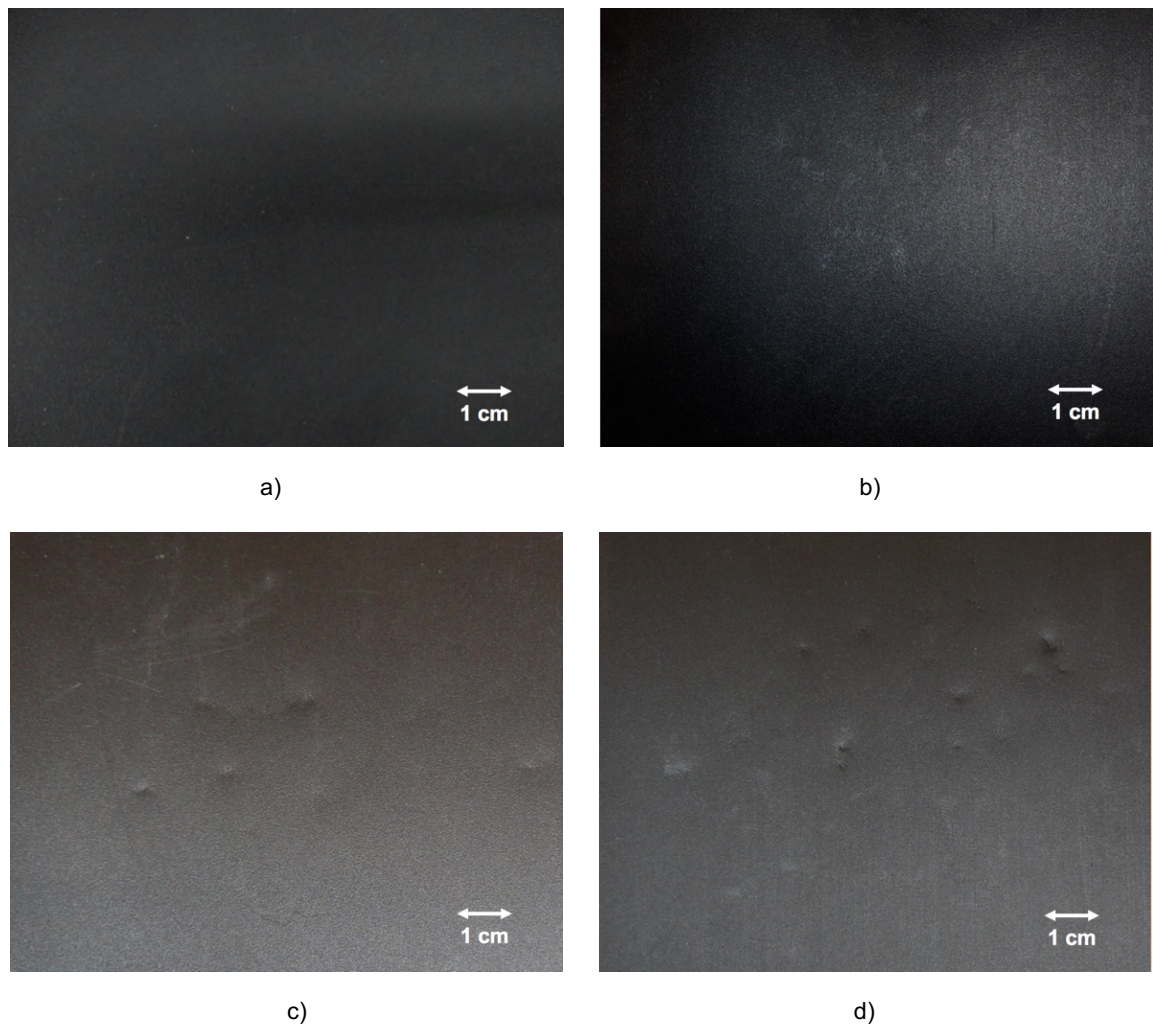


Fig. 5.18 – Geomembrana no ensaio com base rígida e geotêxtil de proteção GTX400: a) Intacto; b) Danificação com *corundum*; c) Danificação com RCD cerâmico; d) Danificação com brita 14/20

#### 5.4.2. ENSAIOS REALIZADOS COM O GEOTÊXTEL DE PROTEÇÃO GTX400

##### 5.4.2.1. Ensaio de tração

Na tabela seguinte estão resumidos os valores médios das tensões e deformações (cedência e rotura) dos provetes antes e após a danificação pelos diferentes agregados e com diferentes bases.

Tabela 5.11 – Valores obtidos nos ensaios de tração da geomembrana antes e após os ensaios de danificação mecânica (ensaio de danificação realizado com GTX400, GMB e GCL)

Geomembrana com geotêxtil GTX400		T <sub>cedência</sub> [MPa]	T <sub>rotura</sub> [MPa]	ε <sub>cedência</sub> [%]	ε <sub>rotura</sub> [%]
Base rígida	Não danificado	20,0 (3,2%)	19,1 (8,0%)	20,5 (5,9%)	627,0 (8,3%)
	Corundum	20,8 (2,0%)	19,0 (5,4%)	20,7 (5,1%)	615,8 (8,6%)
	RCD cerâmico	21,0 (1,2%)	18,7 (9,1%)	20,4 (2,9%)	598,7 (10,8%)
Base flexível (Saibro ID= 50%)	Brita 14/20	21,1 (1,8%)	18,9 (8,1%)	19,3 (3,2%)	557,2 (24,9%)
	Corundum	20,6 (1,7%)	18,0 (5,9%)	19,1 (5,9%)	537,8 (12,0%)
	RCD cerâmico	21,3 (1,6%)	18,4 (3,5%)	20,2 (5,5%)	567,1 (7,9%)
Base flexível (Saibro ID=80%)	Brita 14/20	20,5 (2,2%)	18,5 (4,9%)	19,5 (4,1%)	605,2 (6,9%)
	Corundum	20,7 (1,7%)	23,7 (1,6%)	20,5 (3,9%)	796,1 (2,9%)
	RCD cerâmico	21,2 (1,1%)	22,7 (9,1%)	20,9 (4,6%)	759,3 (13,9%)
	Brita 14/20	21,4 (1,2%)	23,3 (3,4%)	20,5 (4,3%)	777,3 (5,4%)

(entre parêntesis encontram-se os valores dos coeficientes de variação obtidos)

A tensão na cedência apresentou valores entre 20,5 MPa e 21,4 MPa, sendo que os resultados foram idênticos após a danificação com RCD cerâmico e brita 14/20 para a base rígida e para a base flexível com índice de compacidade de 80%. Para a base flexível com índice de compacidade de 50% os resultados após a danificação com o *corundum* e com a brita 14/20 foram mais próximos. A tensão na rotura da geomembrana apresentou algumas variações significativas, uma vez que os seus valores se encontram entre 18,0 MPa e 23,7 MPa. Apesar dos valores não diferirem muito nos ensaios de danificação mecânica na mesma base, entre as diferentes bases existiram variações significativas nos resultados, sendo a geomembrana ensaiada na base flexível com índice de compacidade de 80% a que apresentou tensões na rotura superiores.

Os resultados da deformação na cedência situaram-se entre 19,1% e 20,9%, mostrando que os valores não diferem muito quando se comparam os diferentes agregados e as diferentes bases de danificação. Na deformação na rotura verificou-se que, para a base rígida e para base flexível com índice de compacidade de 50%, os resultados obtidos nas amostras danificadas foram inferiores à amostra de referência. Contudo, para a base flexível com índice de compacidade de 80%, os valores da



deformação na rotura tiveram o efeito contrário, ou seja, os valores obtidos foram superiores à amostra intacta.

De um modo geral, os agregados não provocaram danos significativos na geomembrana (independentemente da base usada), pelo que a função de impermeabilização continuou a ser exercida. Alguns dos parâmetros do ensaio de tração tiveram resultados superiores nos provetes danificados relativamente aos provetes intactos. Isto deveu-se à heterogeneidade do material e é possível verificar que se não existiram reduções no valor desses parâmetros, não existiu danificação do material.

#### 5.4.2.2. Ensaio de punçoamento estático

Na Tabela 5.12 estão apresentados os valores obtidos nos ensaios de punçoamento estático da geomembrana.

Tabela 5.12 – Valores obtidos nos ensaios de punçoamento estático da geomembrana antes e após os ensaios de danificação mecânica (ensaio de danificação realizado com GTX400, GMB e GCL)

Geomembrana com geotêxtil GTX400		F <sub>P</sub> [N]	h <sub>P</sub> [mm]	RPR [%]
Base rígida	Não danificado	5927 (1,6%)	128,4 (1,2%)	-
	<i>Corundum</i>	5874 (1,9%)	124,2 (3,8%)	99,1
	RCD cerâmico	5897 (2,3%)	126,5 (2,4%)	99,5
	Brita 14/20	5789 (2,4%)	122,4 (2,6%)	97,7
Base flexível (Saibro ID=50%)	<i>Corundum</i>	5671 (1,1%)	120,1 (1,5%)	95,7
	RCD cerâmico	5895 (1,6%)	126,1 (1,4%)	99,5
	Brita 14/20	5834 (1,8%)	123,4 (1,7%)	98,4
Base flexível (Saibro ID=80%)	<i>Corundum</i>	5627 (1,6%)	120,0 (1,7%)	94,9
	RCD cerâmico	5604 (0,9%)	120,0 (0,6%)	94,5
	Brita 14/20	5581 (2,1%)	118,4 (2,2%)	94,2

(entre parêntesis encontram-se os valores dos coeficientes de variação obtidos)

Os resultados obtidos no ensaio de punçoamento estático foram bastante positivos, independentemente do agregado e da base de danificação, dado que a capacidade resistente da geomembrana diminuiu, no máximo, 5,8%. É também importante referir que as maiores perdas de resistência residual, mesmo não sendo muito significativas, são provenientes do ensaio de danificação com a base flexível com índice de compacidade de 80%.

O deslocamento na força máxima também não sofreu alterações muito relevantes. Os valores do deslocamento na força máxima exibiram maiores diminuições nos ensaios com a base flexível com índice de compacidade de 80%, sendo essa redução de 128,4 mm para 120,0 mm (*corundum* e RCD cerâmico) e para 118,4 mm (brita 14/20).

Sintetizando, a geomembrana não sofreu perdas de resistência significativas, pelo que a sua função não foi comprometida, independentemente da base de ensaio e dos agregados utilizados.

#### 5.4.2.3. Ensaio de rasgamento

Na Tabela 5.13 estão apresentados os parâmetros provenientes do ensaio de rasgamento.

Tabela 5.13 – Valores obtidos nos ensaios de rasgamento da geomembrana antes e após os ensaios de danificação mecânica (ensaio de danificação realizado com GTX400, GMB e GCL)

Geomembrana com geotêxtil GTX400		F [N]	RRR [%]
Base rígida	Não danificado	345 (1,8%)	-
	<i>Corundum</i>	343 (2,0%)	99,4
	RCD cerâmico	347 (3,4%)	100,4
	Brita 14/20	346 (2,0%)	100,4
Base flexível (Saibro ID=50%)	<i>Corundum</i>	348 (4,2%)	100,8
	RCD cerâmico	347 (4,8%)	100,6
	Brita 14/20	346 (3,1%)	100,1
Base flexível (Saibro ID=80%)	<i>Corundum</i>	367 (5,2%)	106,2
	RCD cerâmico	351 (3,2%)	101,7
	Brita 14/20	364 (2,7%)	105,5

(entre parêntesis encontram-se os valores dos coeficientes de variação obtidos)

Analisando a resistência ao rasgamento residual pode-se verificar que não existiram alterações significativas. Assim, como já foi referido anteriormente, a geomembrana cumpre a sua função de impermeabilização. O comportamento da geomembrana está interligado com a proteção que o geotêxtil exerceu, logo a função para o qual estes materiais foram dimensionados não foi comprometida. Os valores das resistências superiores a 100% devem-se, provavelmente, à heterogeneidade do material e não a um aumento da resistência da geomembrana após danificação.

#### 5.4.3. ENSAIOS REALIZADOS COM O GEOTÊXTEL DE PROTEÇÃO GTX300

##### 5.4.3.1. Ensaio de tração

Na Tabela 5.14 estão apresentados os resultados obtidos nos ensaios de tração da geomembrana protegida com o geotêxtil GTX300.

Tabela 5.14 – Valores obtidos nos ensaios de tração da geomembrana antes e após os ensaios de danificação mecânica (ensaio de danificação realizado com GTX300, GMB e GCL)

Geomembrana com geotêxtil GTX300		T <sub>CED</sub> [MPa]	T <sub>ROT</sub> [MPa]	ε <sub>CED</sub> [%]	ε <sub>ROT</sub> [%]
Não danificado		20,0 (3,2%)	19,1 (8,0%)	20,5 (5,9%)	627,0 (8,3%)
Base rígida	<i>Corundum</i>	21,2 (2,6%)	21,3 (9,8%)	20,4 (2,5%)	699,8 (11,7%)
	RCD cerâmico	21,0 (2,6%)	22,5 (6,5%)	20,7 (4,2%)	761,2 (9,6%)
	Brita 14/20	20,9 (2,3%)	23,1 (0,7%)	20,7 (2,2%)	785,3 (4,3%)

(entre parêntesis encontram-se os valores dos coeficientes de variação obtidos)

A geomembrana, protegida pelo geotêxtil GTX300, apresentou algumas variações nas tensões, sendo que os valores da tensão na cedência se encontraram entre 20,9 MPa e 21,2 MPa e os valores da tensão na rotura situaram-se entre 21,3 MPa e 23,1 MPa. A deformação na cedência teve uma variação entre 20,4% e 20,7%, podendo-se dizer que não se obteve uma variação significativa na deformação, sendo esta independente do agregado de danificação. Enquanto que a geomembrana protegida com o geotêxtil GTX400 apresentou valores da deformação na rotura inferiores à amostra de referência, com o geotêxtil GTX300 obteve-se o efeito contrário, ou seja, os valores da deformação na rotura foram superiores aos obtidos na amostra intacta, o que poderá ser explicado pela existência de alguma heterogeneidade na geomembrana.

Comparando os resultados dos ensaios de tração da geomembrana protegida com os geotêxteis GTX400 e GTX300 pode-se concluir que o comportamento da geomembrana não teve diferenças significativas.

#### 5.4.3.2. Ensaio de punçoamento estático

A Tabela 5.15 permite analisar o comportamento da geomembrana ao punçoamento estático com o geotêxtil de proteção GTX300 e, com o auxílio da Fig. 5.19 é possível comparar com o mesmo ensaio realizado com o geotêxtil GTX400.

Tabela 5.15 – Valores obtidos nos ensaios de punçoamento estático da geomembrana antes e após os ensaios de danificação mecânica (ensaio de danificação realizado com GTX300, GMB e GCL)

Geomembrana com geotêxtil GTX300		F <sub>P</sub> [N]	h <sub>P</sub> [mm]	RPR [%]
Não danificado		5927 (1,6%)	128,4 (1,2%)	-
Base rígida	<i>Corundum</i>	5766 (2,1%)	123,8 (2,6%)	97,3
	RCD cerâmico	5551 (2,5%)	115,0 (6,4%)	93,7
	Brita 14/20	5660 (1,7%)	121,6 (0,7%)	95,5

(entre parêntesis encontram-se os valores dos coeficientes de variação obtidos)

Dos três agregados de danificação, o RCD cerâmico causou perdas de resistência ao punçoamento residual e redução do deslocamento na força máxima superiores, sendo os valores 6,3% e 13,4 mm (de 128,4 mm para 115,0 mm), respectivamente. A geomembrana apresentou uma resistência ao punçoamento residual elevada após o ensaio de danificação, independentemente do geotêxtil de proteção utilizado, uma vez que as reduções da sua capacidade resistente não foram relevantes.

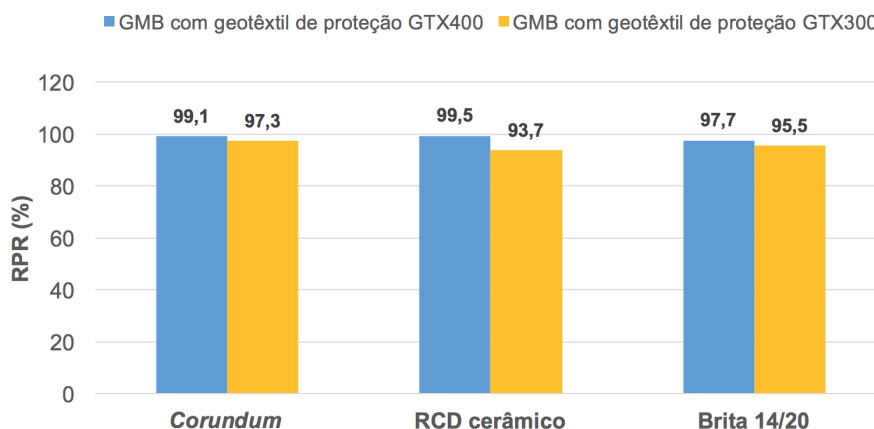


Fig. 5.19 – Resistências ao punçoamento residual da geomembrana com os geotêxteis de proteção GTX400 e GTX300

#### 5.4.3.3. Ensaio de rasgamento

Na Tabela 5.16 estão representados os valores médios da força máxima de rasgamento e a resistência ao rasgamento residual da geomembrana após os ensaios de danificação na base rígida com o geotêxtil de proteção GTX300. A Fig. 5.20 compara o comportamento da geomembrana nos ensaios de danificação com os geotêxteis de proteção GTX300 e o GTX400.

Tabela 5.16 – Valores obtidos nos ensaios de rasgamento da geomembrana antes e após os ensaios de danificação mecânica (ensaio de danificação realizado com GTX300, GMB e GCL)

Geomembrana com geotêxtil GTX300		F [N]	RRR [%]
Base rígida	Não danificado	345 (1,8%)	-
	Corundum	360 (5,6%)	104,3
	RCD cerâmico	368 (3,0%)	106,7
	Brita 14/20	358 (5,3%)	103,8

(entre parêntesis encontram-se os valores dos coeficientes de variação obtidos)

A resistência ao rasgamento da geomembrana, com o geotêxtil de proteção GTX300, não teve reduções significativas, sendo assim possível dizer que nenhum agregado induziu danificação no material. De um modo geral, pode-se concluir que a geomembrana protegida com o geotêxtil GTX400 ou com o GTX300, não sofreu reduções na sua resistência residual ao punçoamento e ao rasgamento. Assim sendo, não existiu nenhuma hipótese da geomembrana comprometer a sua função e,

consequentemente, os geotêxteis foram eficazes na proteção da mesma. Neste estudo, a redução da MUA do geotêxtil de proteção não provocou grande diferença nas propriedades da geomembrana.

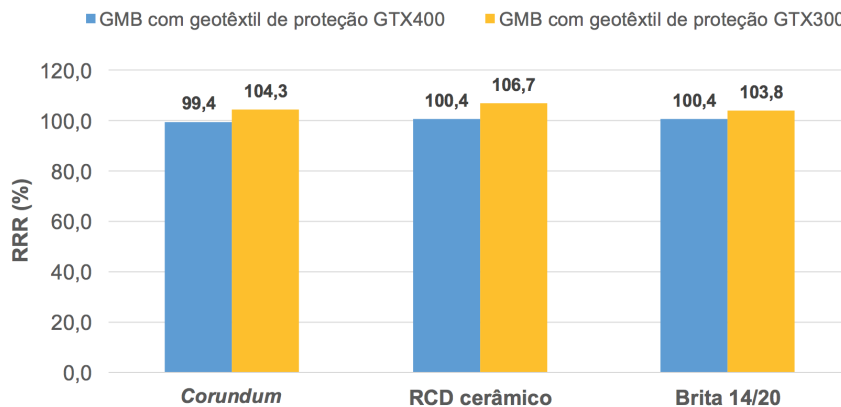


Fig. 5.20 – Resistências ao rasgamento residual da geomembrana com os geotêxteis de proteção GTX400 e GTX300

## 5.5. GEOCOMPÓSITO

### 5.5.1. INSPEÇÃO VISUAL

Para o geocompósito era esperado que a danificação sofrida fosse rara ou inexistente, podendo o contacto com a base de ensaio ser o único fator de danificação do material. O geocompósito não apresentava danos visíveis após os ensaios de danificação mecânica, independentemente da base de danificação utilizada, geotêxtil de proteção ou do agregado de danificação. (Fig. 5.21).

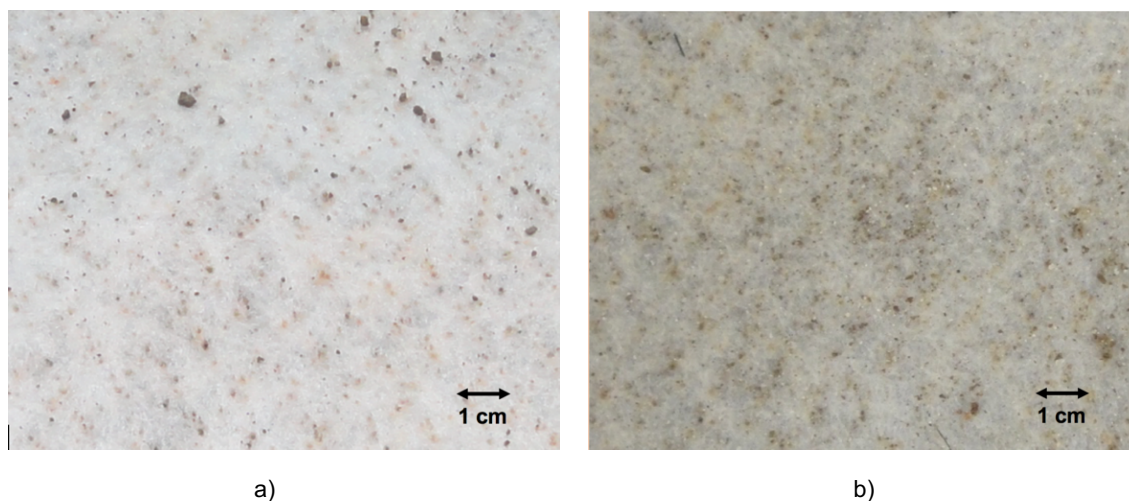


Fig. 5.21 – Geocompósito no ensaio com base rígida e geotêxtil de proteção GTX400: a) Intacto; b) Danificação com corundum

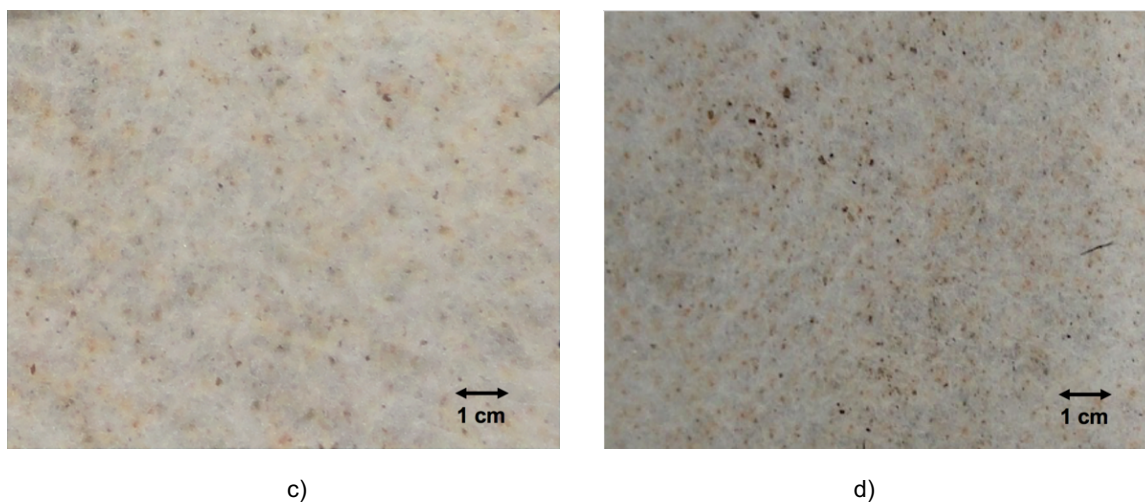


Fig. 5.21 (cont.) – Geocompósito no ensaio com base rígida e geotêxtil de proteção GTX400: c) Danificação com RCD cerâmico; d) Danificação com brita 14/20

## 5.5.2. ENSAIOS REALIZADOS COM O GEOTÊXTIL DE PROTEÇÃO GTX400

### 5.5.2.1. Ensaio de tração

Na Tabela 5.17 estão representados os valores médios da força por unidade de largura, da extensão na força máxima e da resistência à tração residual, após os ensaios de danificação mecânica.

Tabela 5.17 – Valores obtidos nos ensaios de tração do geocompósito antes e após os ensaios de danificação mecânica (ensaio de danificação realizado com GTX400, GMB e GCL)

Geocompósito com geotêxtil GTX400		T [kN/m]	$\varepsilon_{FM}$ [%]	RTR [%]
Base rígida	Não danificado	19,15 (4,7%)	28,7 (9,3%)	-
	<i>Corundum</i>	19,42 (6,9%)	28,8 (7,4%)	101,4
	RCD cerâmico	18,88 (5,8%)	28,4 (10,0%)	98,6
	Brita 14/20	19,68 (7,7%)	28,7 (8,8%)	102,7
Base flexível (Saibro ID=50%)	<i>Corundum</i>	18,77 (4,8%)	28,3 (5,5%)	98,0
	RCD cerâmico	18,37 (5,5%)	27,0 (9,7%)	95,9
	Brita 14/20	19,17 (2,9%)	28,0 (5,4%)	100,1
Base flexível (Saibro ID=80%)	<i>Corundum</i>	19,44 (8,8%)	28,6 (4,7%)	101,5
	RCD cerâmico	18,50 (5,0%)	27,4 (6,2%)	96,6
	Brita 14/20	19,39 (7,0%)	29,3 (8,5%)	101,2

(entre parêntesis encontram-se os valores dos coeficientes de variação obtidos)

Pela análise da tabela pode-se concluir que não ocorreram alterações relevantes em nenhuma das propriedades do geocompósito. As curvas médias força-extensão do geocompósito estão ilustradas na Fig. 5.22.

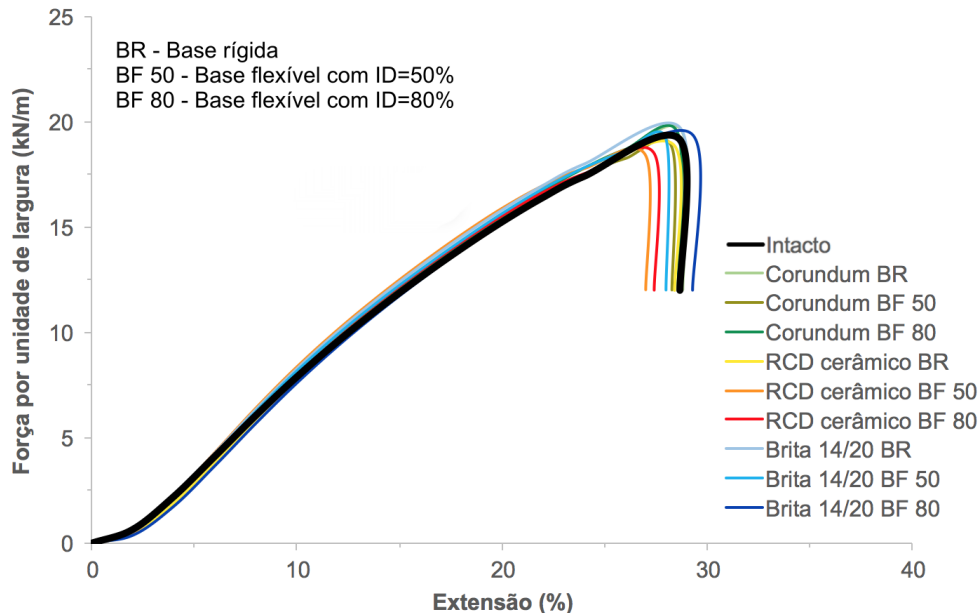


Fig. 5.22 – Curvas médias força-extensão do geocompósito GCL antes e após os ensaios de danificação mecânica (ensaio de danificação realizado com GTX400, GMB e GCL)

A análise das curvas permite concluir que não existem variações muito relevantes na rigidez do geocompósito. Pode também verificar-se que, pela proximidade das curvas, os danos provocados pelos agregados e nas diferentes bases não foram significativos. Assim sendo, não existiram alterações relevantes em nenhuma das propriedades, independentemente da base de ensaio de danificação e do agregado. O geocompósito foi bastante resistente ao ensaio de danificação mecânica, o que se pode observar pela inexistência de alterações relevantes nas propriedades de tração. Desta forma é possível dizer que o geotêxtil e geomembrana protegeram o geocompósito dos agregados no ensaio de danificação mecânica.

#### 5.5.2.2. Ensaio de punção estático

Os resultados obtidos no ensaio de punção estático do geocompósito encontram-se resumidos na Tabela 5.18 e na Fig. 5.23.

Tabela 5.18 – Valores obtidos nos ensaios de punção estático do geocompósito com o geotêxtil de proteção GTX400 antes e após os ensaios de danificação mecânica

Geocompósito com geotêxtil GTX400		F <sub>P</sub> [N]	h <sub>P</sub> [mm]	RPR [%]
Base rígida	Não danificado	2898 (5,7%)	42,5 (8,6%)	-
	Corundum	2803 (6,1%)	39,4 (3,2%)	96,7
	RCD cerâmico	2842 (2,9%)	38,9 (2,2%)	98,1
	Brita 14/20	2808 (5,8%)	40,3 (11,0%)	96,9
Base flexível (Saibro ID=50%)	Corundum	2943 (6,9%)	39,0 (9,4%)	101,5
	RCD cerâmico	2665 (3,8%)	36,6 (10,4%)	92,0
	Brita 14/20	2766 (7,6%)	36,5 (4,4%)	95,5
Base flexível (Saibro ID=80%)	Corundum	2991 (10,5%)	44,8 (5,5%)	103,2
	RCD cerâmico	2977 (11,5%)	44,8 (8,4%)	102,7
	Brita 14/20	3042 (11,7%)	48,3 (5,2%)	105,0

(entre parêntesis encontram-se os valores dos coeficientes de variação obtidos)

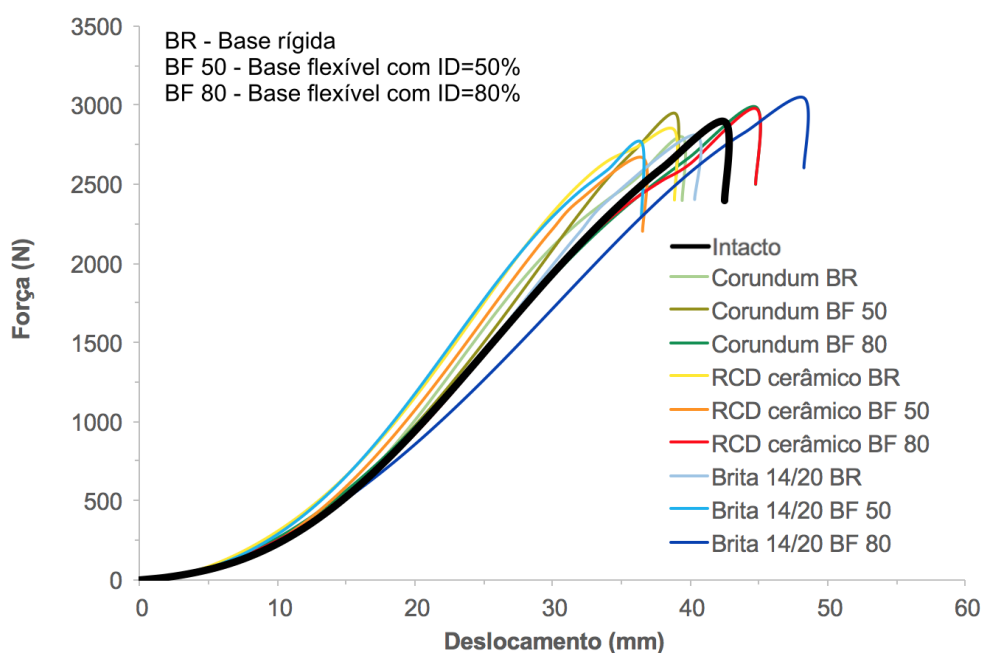


Fig. 5.23 – Curvas médias força-deslocamento do geocompósito GCL antes e após os ensaios de danificação mecânica (ensaio de danificação realizado com GTX400, GMB e GCL)

A Tabela 5.18 e a Fig. 5.23 permitem concluir que o geocompósito, independentemente da base do ensaio de danificação e do agregado utilizado, não sofreu alterações significativas das suas propriedades. Tal como era esperado, as propriedades de punção e de tração do geocompósito não apresentaram alterações relevantes.



## 5.5.2. ENSAIOS COM O GEOTÊXTIL DE PROTEÇÃO GTX300

## 5.5.3.1. Ensaio de tração

Os valores médios da força máxima por unidade de largura, extensão na força máxima e a resistência à tração residual estão representados na Tabela 5.19.

Tabela 5.19 – Valores obtidos nos ensaios de tração do geocompósito antes e após os ensaios de danificação mecânica (ensaio de danificação realizado com GTX300, GMB e GCL)

Geocompósito com geotêxtil GTX300		T [kN/m]	$\varepsilon_{FM}$ [%]	RTR [%]
Base rígida	Não danificado	19,15 (4,7%)	28,7 (9,3%)	-
	<i>Corundum</i>	19,26 (4,7%)	28,5 (9,0%)	100,6
	RCD cerâmico	19,14 (4,5%)	28,6 (8,9%)	99,9
	Brita 14/20	18,86 (3,0%)	28,5 (4,0%)	98,5

(entre parêntesis encontram-se os valores dos coeficientes de variação obtidos)

Os agregados, à semelhança do ensaio de tração nas mesmas condições com o geotêxtil de proteção GTX400, não provocaram alterações relevantes no comportamento do geocompósito à tração.

A observação das curvas médias (Fig. 5.24) permite retirar conclusões idênticas às obtidas com o geotêxtil de proteção GTX400, ou seja, não existiram variações muito relevantes na rigidez. A sobreposição das curvas mostra que não existem alterações relevantes nas propriedades do material.

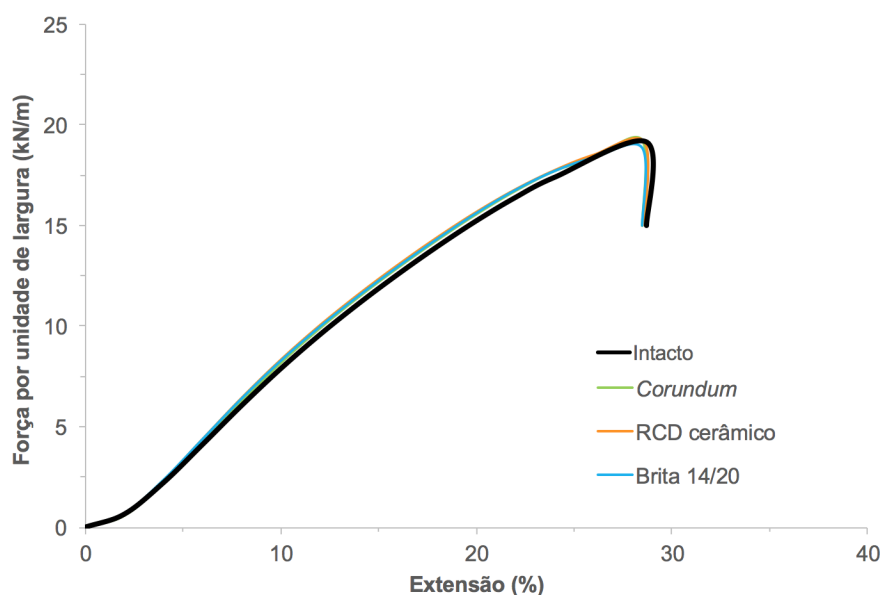


Fig. 5.24 – Curvas médias força-extensão do geocompósito GCL antes e após os ensaios de danificação mecânica (ensaio de danificação realizado com GTX300, GMB e GCL)

## 5.5.3.2. Ensaio de punçoamento estático

A Tabela 5.20 permite analisar o comportamento do geocompósito ao punçoamento estático com o geotêxtil de proteção GTX300.

Tabela 5.20 – Valores obtidos nos ensaios de punçoamento estático do geocompósito com o geotêxtil de proteção GTX300 antes e após os ensaios de danificação mecânica

Geocompósito com geotêxtil GTX300		$F_p$ [N]	$h_p$ [mm]	RPR [%]
Base rígida	Não danificado	2898 (5,7%)	42,5 (8,6%)	-
	Corundum	2908 (4,1%)	44,5 (9,3%)	100,4
	RCD cerâmico	2842 (5,5%)	46,1 (10,0%)	98,1
	Brita 14/20	2895 (6,2%)	43,8 (13,2%)	99,9

(entre parêntesis encontram-se os valores dos coeficientes de variação obtidos)

Na Fig. 5.25, as curvas médias força-deslocamento do ensaio de punçoamento permitem concluir que apesar da proximidade entre as curvas, os deslocamentos na força máxima foram superiores nas amostras danificadas do que nas amostras intactas.

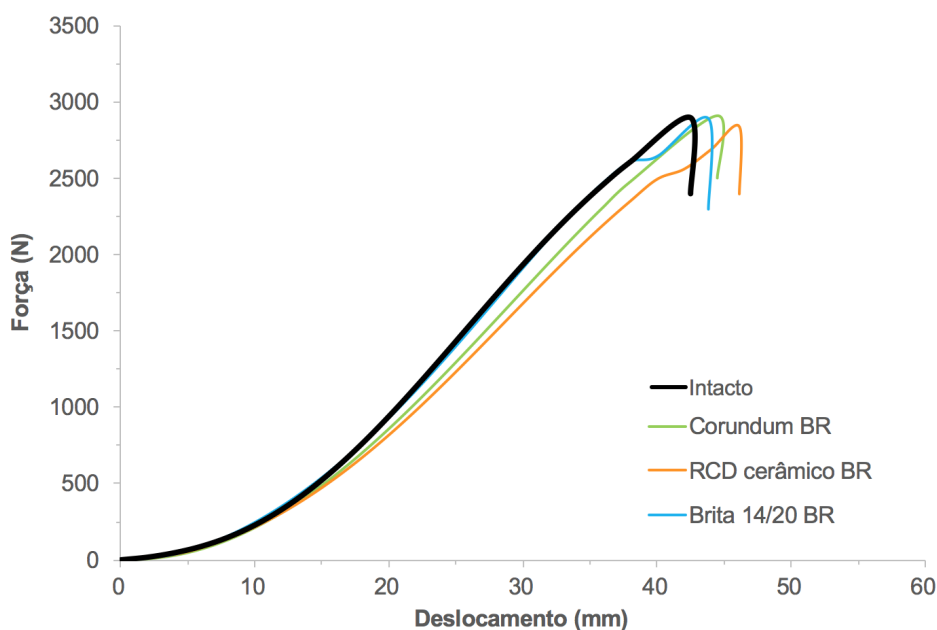


Fig. 5.25 – Curvas médias força-deslocamento do geocompósito GCL antes e após os ensaios de danificação mecânica (ensaio de danificação realizado com GTX300, GMB e GCL)

Os ensaios de tração e de punçoamento realizados com o geocompósito permitiram tirar conclusões semelhantes, isto é, o material não sofreu danificações, quer por parte dos agregados quer por parte da base do ensaio de danificação.

## 6

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

## 6.1. PRINCIPAIS CONCLUSÕES

Os danos visíveis provocados pela danificação mecânica nos geotêxteis e na geomembrana incluíram apenas alguns punçoamentos pontuais devido à forma e dimensões dos agregados. É de salientar que nos geotêxteis, os agregados deixaram alguma sujidade e causaram alterações na cor dos materiais, principalmente o RCD cerâmico, devido à sua fragmentação em partículas menores durante o ensaio de danificação mecânica. O geocompósito não apresentou danos visíveis uma vez que era a camada do sistema de impermeabilização mais distante dos agregados. As bases do ensaio de danificação, por não terem partículas angulosas, não provocaram danos na superfície inferior do geocompósito.

O *corundum* foi o agregado que induziu uma maior diminuição da resistência à tração e ao punçoamento estático dos geotêxteis, independentemente da MUA dos materiais, da base de ensaio e do modo de ensaio de danificação mecânica utilizado (ensaio com a combinação dos três geossintéticos ou com o geotêxtil isoladamente). A diferença entre os resultados da danificação dos geotêxteis causada pelo RCD cerâmico e pela brita 14/20 foi pequena. No entanto o RCD cerâmico provocou uma menor perda da resistência à tração na maior parte dos casos (à exceção do ensaio de danificação mecânica com a base rígida e com o geotêxtil de proteção GTX300). O RCD cerâmico foi, também, o agregado que induziu uma menor redução na resistência ao punçoamento dos geotêxteis (exceção para o geotêxtil GTX300 danificado isoladamente). Assim sendo, pode concluir-se que o *corundum*, como agregado normativo, estabeleceu uma abordagem conservativa relativamente aos restantes agregados utilizados.

A geomembrana é o geossintético mais importante do sistema de impermeabilização, uma vez que é responsável por impedir a passagem de líquidos ou gases provenientes dos resíduos. Deste modo, é essencial que as suas propriedades sofram a menor danificação possível ou, se possível, não sofram alterações. A tensão de cedência e a tensão de rotura não sofreram variações significativas (exceção no ensaio de danificação na base flexível com índice de compacidade de 80%, onde a tensão de rotura aumentou ligeiramente). A resistência ao punçoamento teve diminuições até cerca de 7%. Pode concluir-se também que a resistência ao rasgamento não obteve diminuições. Essas reduções não são relevantes nem impossibilitam a geomembrana de cumprir a sua função, independentemente do geotêxtil de proteção utilizado. Assim, a função de proteção da geomembrana foi cumprida pelos geotêxteis, quer o GTX300 quer o GTX400.

Como seria de esperar, os danos sofridos pelo geocompósito não foram significativos, uma vez que a sua resistência à tração teve reduções até cerca de 5% e a resistência ao punçoamento reduziu até 8% após os ensaios de danificação mecânica (no ensaio de punçoamento estático com o geotêxtil GTX400 na base flexível com índice de compacidade de 50%).

De um modo geral, o RCD cerâmico e a brita 14/20 não foram os agregados que provocaram maiores reduções nas resistências dos geossintéticos, pelo que poderia ser ponderada a sua utilização na camada drenante em aterros. No entanto, para que se reduzisse a utilização de recursos naturais, o RCD cerâmico poderia ser uma hipótese mais interessante. A utilização do RCD cerâmico não só tem vantagens económicas, como também poderia substituir um agregado natural no seu desempenho como camada drenante.

Após a análise da danificação ocorrida nos geossintéticos em estudo, pode-se concluir que, em termos de propriedades mecânicas dos materiais, os danos provocados pelos agregados não deverão comprometer o bom funcionamento do sistema de impermeabilização e que tanto o geotêxtil GTX400 como o GTX300 desempenham corretamente a sua função de proteção da geomembrana.

## **6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS**

Como a capacidade resistente dos geotêxteis utilizados não sofreu reduções que colocassem em causa a sua função de proteção da geomembrana, poder-se-ia realizar o mesmo procedimento experimental utilizando geotêxteis com menor MUA.

A utilização de outro tipo de agregados no ensaio de danificação mecânica, preferencialmente RCDs, seria pertinente para a comparação do comportamento dos geossintéticos. A utilização de RCDs na camada drenante é uma vantagem, uma vez que permite a redução da utilização de recursos naturais e a emissões de gases com efeito de estufa provenientes dos processos de extração de matéria prima.

De modo a obter conclusões mais fiáveis, seria pertinente a realização de ensaios *in situ*, para uma posterior comparação com os resultados obtidos em laboratório.

Finalmente, os geossintéticos do sistema de impermeabilização, principalmente o geotêxtil e a geomembrana, poderiam ser expostos a agentes de degradação químicos e biológicos, tal como a ação dos líquidos após a danificação mecânica para que a avaliação do comportamento dos geossintéticos fosse o mais aproximado de uma situação real de aterro de resíduos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen, T. M., Bathrust, R. J. (1994). *Characterization of Geosynthetics Load-Strain Behaviour After Installation Damage*, *Geosynthetics International*, Vol. 1, pp. 181- 199
- ASTM D638 (2014). *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*.
- ASTM D792 (2013). *Standard Test Method for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement*.
- ASTM D1004 (2013). *Standard Test Method for Tear Resistance (Graves Tear) of Plastic Film and Sheeting*.
- ASTM D1505 (2010). *Standard Test Method for Density of Plastics by Density-Gradient Technique*.
- ASTM D4253 (2016). *Standard Test Methods Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table*.
- ASTM D4254 (2016). *Standard Test Methods Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density*.
- ASTM D4751 (2016). *Standard Test Method for Determining Apparent Opening Size of a Geotextile*.
- ASTM D5199 (2012). *Standard Test Method for Measuring the Nominal Thickness of Geosynthetics*.
- ASTM D5261 (2010). *Standard Test Method for Measuring Mass per Unit Area of Geotextiles*.
- ASTM D5993 (2014). *Standard Test Method for Measuring Mass per Unit of Geosynthetic Clay*.
- Austin, R. A. (1998). *Installation Effects on Geosynthetics*. Seminar volume on installation damage in geosynthetics, pp. 3.2.1 – 3.2.10, Leatherhead, Reino Unido.
- Barbedo, D. (2013). *Consideração da Natureza do Fluido Percolante no Dimensionamento de Fundações de Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos*. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico.
- Barroso, M., Lopes, M. G., Mota, R., Coimbra, L., Matutino, P., Dores, R., Silva, F. (2014). *Sistemas De Impermeabilização de Aterros de Resíduos: Equipamento Semiautomático para Detecção de Orifícios em Geomembranas (GeoSafe)*. 14º Congresso Nacional de Geotecnia, p.1, Covilhã.
- Braü, G. (1998). *Experience with Damage During Installations in Germany - Field and Laboratory Testing*. Seminar volume on installation damage in geosynthetics; pp. 41 - 44, Leatherhead, Reino Unido.
- Carlos, D. M., Carneiro, J. R., Pinho-Lopes, M., Lopes, M. L. (2015). *Effect of the Soil Size Distribution on the Mechanical Damage of Nonwoven Geotextiles Under Repeated Loading*. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, pp. 3 - 4.
- Carneiro, J.R. (2009). *Durabilidade de Materiais Geossintéticos em Estruturas de Carácter Ambiental - A Importância da Incorporação de Aditivos Químicos*. Tese de Doutoramento em Engenharia do Ambiente, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Carneiro, J. R., Morais, L. M., Lopes, M. L. (2012). *Efeito do Processo de Instalação no Comportamento Mecânico de Geotêxteis Não-tecidos*. 13º Congresso Nacional de Geotecnia. CD-ROM, 7p, Lisboa.
- Carvalho, F. (2014). *Resistência de Um Geocompósito de Reforço à Danificação Durante a Instalação E à Abrasão*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

- Christopher, B. R., Elias, V. (1998). *Evaluation of Installation Damage in Geosynthetics: a US Perspective*. Seminar volume on installation damage in geosynthetics, pp. 1.2.1 – 1.2.12, Leatherhead, Reino Unido.
- Costa, C. N. (2006). *Fundamentos de Geotecnia*. Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade Nova de Lisboa, Capítulo 7, Lisboa
- Decreto-Lei no 183/2009 (2009) – Regime jurídico da deposição de resíduos em aterro
- Duarte, A. (2009). *Aplicação de Geossintéticos na Impermeabilização e Selagem de Aterros*. Dissertação de Mestrado em Engenharia do Ambiente, Universidade de Aveiro.
- EN ISO 10722 (2007). *Geosynthetics Test Procedure for the Evaluation of Mechanical Damage Under Repeated Loading – Damage Caused by Granular Material*
- EN ISO 12956 (1999). *Geotextiles and Geotextile-related Products- Determination of the Characteristics Opening Size*.
- Escórcio, F. (2016). *Resistência de Geossintéticos à Danificação Mecânica e Abrasão*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Ferreira, F. B. (2010). *Comportamento das Interfaces Solo-geossintético*. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Ferreira, F. B. (2015). *Interação Solo-geossintético em Condições de Carregamento Monotónico e Cíclico*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
- Ingold, T. S. (1994). *The Geotextiles and Geomembranes Manual*. 1a edição, Elsevier Advanced Technology, Oxford, Reino Unido.
- Ingold, T., Miller, K. S. (1998). *Geotextiles Handbook*. Thomas Telford, Londres, Reino Unido.
- Jewell, R.A. (1996). *Soil Reinforcement with Geotextiles*. Construction Industry Research and Information Association, Maryland, USA.
- Koerner, R.M. (1999). *Designing with geosynthetics- 4th Edition*. Prentice-Hall, Upper River, NJ, USA.
- Koerner, R.M. (2012). *Designing with geosynthetics- 6th Edition Vol.1*. Xlibris Corporation, Indiana, USA.
- Koerner, R.M. (2016). *Geotextiles From Design to Applications*. Elsevier Ltd., Duxford, Reino Unido.
- Lopes, M.L. (1998). *Aplicação de Geossintéticos em Engenharia Civil*, Texto de apoio da unidade curricular, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Lopes, M. P., Lopes, M. L., Paula, A. M. (2006). *Avaliação da Fiabilidade dos Ensaios de Laboratório na Previsão da Danificação Durante a Instalação In Situ de Geossintéticos*. Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia nº 108, pp. 175-195
- Lopes, M. P., Lopes, M. L. (2010). *Durabilidade de Geossintéticos*. FEUP Edições, Porto.
- Moreira, S. P. (2009). *Efeitos da Danificação Mecânica de Geossintéticos no Comportamento como Filtro em Sistemas de Cobertura de Estruturas de Confinamento de Resíduos*. Dissertação de Mestrado em Engenharia do Ambiente, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

- Moreira, S. P., Lopes, M. L., Carneiro, J. R. (2010). *Efeito da Danificação Durante a Instalação na Permeabilidade Normal ao Plano de Geotêxteis Não-Tecidos*, pp. 2029-2038.
- NP EN ISO 9863-1. (2006). *Geossintéticos - Determinação da espessura e Pressões Especificadas*.
- NP EN ISO 9864. (2006). *Geossintéticos - Ensaio para a Determinação da Massa por Unidade de Área de Geotêxteis e Produtos Relacionados*.
- NP EN ISO 10318. (2005). *Geossintéticos – Termos e Definições*.
- NP EN ISO 10319. (2005). *Geotêxteis - Ensaio de Tração em Tiras Largas*.
- NP EN 14196 (2007). *Geossintéticos - Métodos de Ensaio para a Determinação da Massa por Unidade de Área das Barreiras Geossintéticas Argilosas*.
- NP EN ISO 11058. (2003). *Geotêxteis e Produtos Relacionados – Determinação das Características de Permeabilidade à Água Normal ao Plano, sem Confinamento*.
- NP EN ISO 12236. (2008). *Geossintéticos - Ensaio de Punçoamento Estático (ensaio CBR)*.
- NP EN ISO 12958. (2005). *Geotêxteis e Produtos Relacionados – Determinação da Capacidade de Escoamento no seu Plano*.
- Página da Internet da BBF Tecnologias do Ambiente (<http://bbf.pt/index2.asp>). Consultada em Julho 2017.
- Paula, A. M. (2003). *Danificação Durante a Instalação – Avaliação Laboratorial da Influência no Comportamento dos Geossintéticos*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Pinho-Lopes, M. (2004). *Estudo dos Coeficientes de Segurança a aplicar a Estruturas de Controlo de Erosão e de Estabilização de Maciços com Geossintéticos*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Pinho-Lopes, M., Lopes, M. L. (2010). *A Durabilidade dos Geossintéticos*. FEUP Edições, Porto.
- Rhyner, C. R., Schwartz, L. J., Wenger, R. B., Korell, M. G. (1995). *Waste Management and Resoucer Recovery*. Lewis Publishers, USA
- Shukla, S.K. (2002). *Geosynthetics and Their Applications*. Thomas Telford Publishing, Londres, Reino Unido.
- Shukla, S.K. (2016). *An Introduction to Geosynthetics Engineering*. Taylor & Francis Group, Londres, Reino Unido.
- Silva, A. (2016). *Avaliação da Danificação Mecânica de Geossintéticos Causada por Resíduos Reciclados*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Violante, F. (2016). *Caracterização da Danificação Mecânica de Geossintéticos*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Williams, Paul T. (2005). *Waste Treatment and Disposal – 2nd Edition*. John Wiley & Sons Ltd, West Sussex, Reino Unido.